

バッテリーフリーの携帯電話

VAMSI TALLA, BRYCE KELLOGG, SHYAMNATH GOLLAKOTAヨシユアR. SMITH、

コンピュータ科学と工学と電気工学専攻、ワシントン大学のポール・G.アレン・スクール

私たちは、電力のわずかなマイクロワットを消費最初の電池不要の携帯電話のデザインを提示します。私たちのデザインは、スピーチを感知イヤホンを作動させ、そして全てリアルタイムで、アップリンクとダウンリンクの通信を切り替えることができます。同時に、連続的に動作するバッテリーフリーの携帯電話を可能にし、電力を収穫しながら、私たちのシステムは、音声の送受信を最適化します。バッテリーフリーデバイスのプロトタイプは、プリント回路基板上の商用の既製コンポーネントを使用して構築されます。それ31フィート（9.4メートル）離れた基地局によって送信されたRF信号から採取された電力で動作することができます。さらに、小さなフォトダイオードと、周囲の光から収穫の電力を使用して、我々は我々のデバイスは、50フィート（15.2メートル）離れている基地局と通信できることを示しています。最後に、私たちは、カスタムブリッジ基地局を経由して、携帯電話ネットワークを介してバッテリーフリー電話を使用して、最初のSkype通話を行います。私たちが信じているこれは電池不要のデバイスの機能と完全に機能するバッテリーフリーの携帯電話に向けたステップの主要な飛躍です。

CCSの概念：・コンピュータシステムの組織 → Embeddedおよびサイバー物理システム。・人間中心のコンピューティング → ユビキタス・モバイルコンピューティング。

追加のキーワードや語句：バッテリーフリー電話。RFパワー＆フォトダイオード収穫。後方散乱通信。

ACMリファレンス・フォーマット：

Vamsi TALLA, ブライスケロググ、Shyamnath GollakotaとジョシユアR.スミス。2017バッテリーフリーの携帯電話。PACM相互作用します。モブ。ウェアラブルユビキタス技術総合。

1、2、第25条（2017年6月）、20ページ。DOI：http://doi.org/10.1145/3090090

1はじめに

このホワイトペーパーでは、次の質問をする：我々は、電力のだけfewmicro-ワットを消費しながら動作し、バッテリーフリー携帯電話を設計することはできますか？電池は、軽量、バルク、コストを追加し再充電や交換が必要であることを考えると、肯定的な回答は、電池を必要とせずに双方向通信機能を持つ携帯電話を可能にします。さらに、マイクロワットの電力電話は無線信号とフォトダイオードの代わりに、かさばるし、高価な太陽電池を含めて安価で軽量な収穫源を使用することができます。最後に、このような設計は、電池不要のデバイスの能力の基本的な飛躍を表します。

基地局に送信、デバイスでスピーチを感知し、基地局からの音声情報を受信し、最終的にスピーカー/イヤホンを作動させる：これを達成するための重要な課題は、携帯電話の基本的な操作をperformmultipleするために必要とされることです。電池不要の携帯電話システムを設計する電力はわずかなマイクロワットを使用して、リアルタイムで、これらすべての機能を実行するために私たちを必要とします。

この課題を理解するために、既存の低電力電池不要のセンサの試作品を見て有益です。そのような加速度計[35]、湿度[34]温度センサ[35]などのRFパワーセンサーは頻繁に一度、数秒または数分をセンサデータを送信するduty-cycledれます。[27、37]は広範囲必要とするRFパワーカメラ

個人や教室での使用のために、この作品の全部または一部のデジタルまたはハードコピーを作成するための許可を無償で付与されているコピーが作られたり、分散利益や商業的利益のためにとコピーが、この通知と最初のページの完全な引用を負担することをされていないことを提供。ACMよりも他の人が所有しているこの作品のコンポーネントの著作権は尊重されなければなりません。クレジットで抽象化が許可されています。サーバー上で投稿するか、リストに再配布することは、そうでない場合は、コピー、または再発行するには、事前特定の権限および/または料金が要ります。permissions@acm.orgからの要求の権限。

©2017 ACM。2474-9567 / 6分の2017-ART25 \$ 15.00 DOI：http://doi.org/10.1145/3090090

インタラクティブ、モバイル、ウェアラブルとユビキタス技術、巻上ACMの議事。1、第2、第25条発行年月：2017年6月。

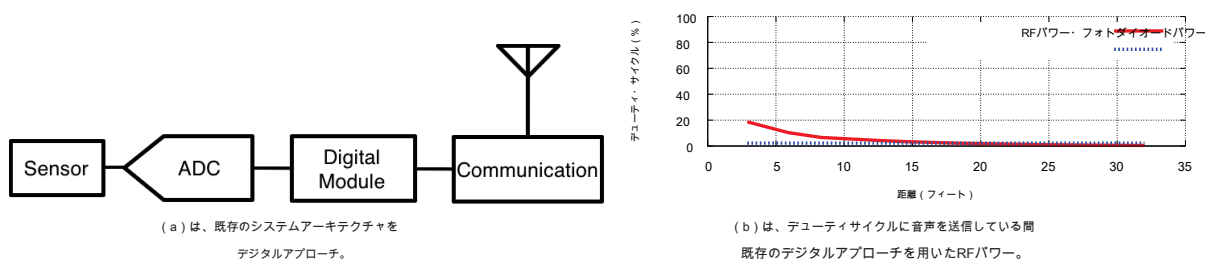


図1. センシングのためのデジタルアプローチ。(a)は、既存の無線センサシステムのアーキテクチャを示し、(b)は、無線デジタルマイクロフォンのための対応するデューティサイクルを示します。私たちは、15.3を消費ADMP801のマイクを使用します。私たちは μ 私たちのセンサーとしてW [1]。我々は8 kHzのサンプリングレートでMSP430FR5969マイクロコントローラのデジタル変換器(ADC)と8ビットの内部アナログとマイクロフォンの出力をデジタル化します。我々は戻って基地局へのデジタル後方散乱を使用してデータを送信します。システムは、8kHzで1 mWwhileその送信音声の平均電力を消費します。我々は、デバイスがフォトダイオードによって供給されて同様の実験(詳細は§4.1.2参照)500ルクスの収穫周囲光を行います。

数十分のデューティサイクルは捕捉、処理及び単一のフレームを通信するために十分なエネルギーを収穫します。対照的に、携帯電話は、音声を感じする必要がスピーカイヤホンを作動し、すべてリアルタイムで、アップリンクとダウンリンク通信との間で切り替えます。これは、システムに重大な制約を課します。

私たちは、電力のわずかなマイクロワットを消費最初の電池不要の携帯電話のデザインを提示します。この目標を達成するために、我々は電池不要のシステムアーキテクチャの大幅な再設計を行います。特に、図1(a)は、既存のバッテリーフリーシステムのアーキテクチャを示す：センシング及び通信モジュールは、デジタルコンピューティングモジュール(例えば、マイクロコントローラ/フィールド・プログラマブル・ゲート・アレイ)を介してインタフェースされます。ADCは、通信モジュールに接続されたマイクロコントローラによって処理されるセンサ入力データをデジタル化します。問題は、このアーキテクチャは、以下の理由により、リアルタイムの操作に対応していないということです。

- 通信は、後方散乱を使用して電力を効率的に行うことができるが、そのようなマイクロコントローラ及びフィールドプログラマブルゲートアレイ(FPGA)などのデジタル計算モジュールは、上記アーキテクチャのボトルネックです。具体的には、これらのモジュールは、私たちの目標消費電力よりも大きさが多くの電力の注文を消費します。
- 上記のアーキテクチャは、センサと、コンピューティングモジュール[39]との界面電力を消費ADCおよびアナログ変換器(DACの)デジタルが必要です。我々はADCに離散レベルよりも小さい変更についての情報を失うので、我々は、無線チャネルの変動に適応するために、自動利得制御モジュールを必要とします。これらのすべての機能を大幅にリアルタイムで動作する当社の能力を制限し、電力を消費します。

上記バッテリーフリー設計の限界を説明するために、我々は、RFとフォトダイオードの電力収穫の両方を使用して無線デジタルマイクシステムのパフォーマンスを測定します。図RFパワーマイクとフォトダイオード給電マイクロホンの両方にマイクデータを受信し、基地局からの距離の関数としてプロット1のデューティサイクル。RF給電マイクロホンは基地局からの10フィートの距離で3フィートで20%のデューティサイクル及び5%のデューティサイクルで動作することができます。フォトダイオード給電バージョンは500ルクスの周囲光設定の2.5%の一定のデューティサイクルを有します。ここで重要な課題は、収穫電力はわずかなマイクロワットが利用可能であるのに対し、ADCおよびデジタル演算は、電力のミリワットを消費することです。電池不要のデバイスを既存のこの力広範囲のデューティサイクル彼らの操作をします。

これらの課題を克服するために、我々は、図1に示すアーキテクチャを提示。2います *バイパス* センサと通信との間の計算モジュール。具体的には、アップリンク上で、代わりに、センサ信号をデジタル化するADCを使用して、再度後方散乱を使用してRF信号を作成する、我々は直接にアナログセンサデータのFED純粋にアナログシステムを作成するには、この消費電力の変換処理を省きます後方散乱モジュール。我々は、アナログセンサをインタフェースするインピーダンス整合ネットワークを設計、同時にへの電力を収穫しながら、後方散乱アナログ音声信号を最大化するアンテナに、すなわち、エレクトレットマイクロフォン

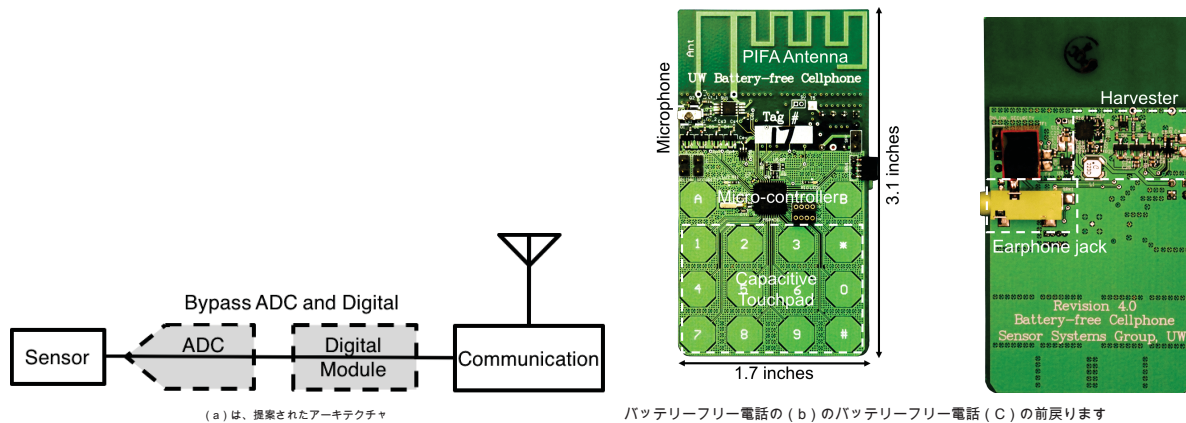


図2. バッテリーフリー電話のプロトタイプ。センサと通信との間の計算モジュールをバイパスする我々のアーキテクチャ。また、バッテリーフリー電話のPCBプロトタイプの前面と背面を示しています。

連続バッテリーのない動作を可能にします。同様に、ダウンリンク上で、代わりにその後DACを使用して、イヤホンに供給される基地局からデバイスへデジタルデータを送信する、基地局は、直接ヘッドホンを作動させるRF送信で符号化アナログ音声データを送信します。我々は、基地局からの音声符号化されたRF送信のエンベロープを最適化し、同時にRFトランスミッションからの音声及び収穫電力を受け取り、連続バッテリーフリー電話の操作を可能にするために最適なダウンリンクインピーダンス整合ネットワークを設計します。

私たちは、プリント回路基板 (PCB) 上の商用オフザシェルフ (COTS) コンポーネントを使用して、バッテリー電話の携帯電話を実装します。図2に示すように、我々は、我々の設計に2 dBiの利得印刷逆Fアンテナ (PIFA) を使用する。2. PIFAアンテナの設計は、比較的大きな接地面とのサイズ、非指向性と効率的な動作との間の良好なトレードオフです。私たちのプロトタイプは、ユーザと対話するために静電容量式タッチボタンとLEDが付属しています。我々のデバイスは、DC出力にそれぞれ入射RF及び周囲光に変換するRFならびにフォトダイオードハーベスターを使用しています。RF電力供給装置は、電力が、これによりデバイスのコストおよびサイズを削減し、基地局31からフィートまで動作することができるための通信アンテナを再使用するという利点を有します。また、RFパワーデバイスは、天候や照明条件とは独立して動作することができます。cm2) 直流電力に500ルクスの周囲光に変換すると、基地局50からフィートまで動作することができます。

要約すると、本論文では、次の重要な技術的な貢献を行います

- 私たちはfewmicro-ワットを消費し、第1の電池のない携帯電話を作成し、電池不要のシステム上の発言を送受信するための単一のプラットフォームにアナログ後方散乱マイクとAM受信機を統合します。我々のバッテリーフリーシステムは、連続的に小さなフォトダイオードを使用して基地局と同様に、周囲光により伝送されるRF信号から収穫電力で動作することができます。
- 我々は、共同異なる収穫アプローチのためのエネルギーハーベスティング、アナログ音声伝送およびアナログ音声受信を最適化します。具体的には、連続的に音声を受信するために受信機を連続的に音声を送信するために後方散乱マイクに最適なインピーダンス整合ネットワークを設計しています。私たちは、RFとフォトダイオード駆動の携帯電話の両方のネットワークにマッチするデザイン。
- 私たちは、電池不要の携帯電話を使用して、最初のSkype通話を行います。後者は、Skypeのプラグインを使用して携帯電話ネットワークと相互作用し、私たちの携帯電話と携帯電話ネットワークとの間の接続をブリッジしながら、具体的には、電池不要の携帯電話は、基地局との会話や状態情報を伝達します。

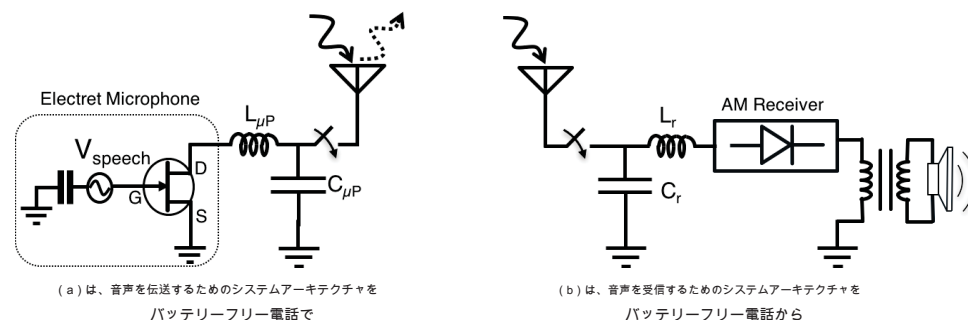


図3. スピーチを送受信するためのアーキテクチャ。私たちは、アナログアプローチを使用して、バッテリーフリー電話でスピーチを送受信するために使用されるシステムのアーキテクチャを示しています。

2概要

通信し、基地局との座標、感知した音声を送信する音声を受信し、スピーカを作動さ：携帯電話は、3つの基本的な操作を行う必要があります。バッテリーフリーのデバイスは、専用の基地局を活用することで、これらすべての操作を実行します。高いレベルでは、我々は、そのような基地局に調整とセルラネットワークとの通信などの全ての電力を消費構成および動作を委譲します。

物理層では、電池不要の携帯電話は、電話と携帯電話ネットワークとの間の接続を橋渡しする責任がある基地局とのみ通信します。電話が直接基地局からのアナログ音声を受信するためにパッシブマイクと振幅変調から音声を送信するためにアナログ後方散乱を使用します。電話が基地局と状態情報と座標を通信するために既存のデジタル後方散乱技術を使用します。後方散乱送信機は[24]ラジオに比べて大きさがより低い電力の3-4次数であり、携帯電話の消費電力を最小限に抑えます。基地局は、RF搬送波の存在下および非存在下で情報を符号化してデジタルデータを送信します。携帯電話は電源[26]の数マイクロワットを消費しながらデジタルビットを復号するエンベロープ検出器ベースの受信機を使用します。基地局は、携帯電話ネットワークとの接続を確立し、管理するために、SkypeのAPIを使用しています。これは、携帯電話ネットワークとバッテリーフリーの携帯電話間のコーディネイト接続にカスタムのステートマシンを実装しています。

3 BATTERY-FREE SPEECHの送受信

スピーチを送受信するために、既存のADCとDACベースのアプローチは、リアルタイムのバッテリーフリーのアプリケーションに適用できるようにあまりにも多くの電力を消費します。これらの欠点に対処するために、我々は、電力のわずが数マイクロワットを消費する音声送信および受信のためのアナログ技術を提示します。

3.1バッテリーフリー電話から音声を送信

私たちのデザインは、[3]グレートシールバグからインスピレーションを取り、アナログ後方散乱を使用しています。基地局へのパッシブマイクからのアナログ後方散乱では、私たちに直接後方散乱スピーチ。このアプローチを理解するために、私たちは図3 (a) に示す我々のシステムの高レベルアーキテクチャを見てみましょう。これは、直接RFスイッチを介してアンテナに接続されたエレクトレットマイクロホン (EK-2302 4から00 [4]) から成ります。RFスイッチは、それぞれ、音声送信と他の動作モードで電話を構成するアンテナからマイクを接続し、切断するために使用されます。RFスイッチの制御と動作は§4に記載されています。

エレクトレットマイクは、任意の電力を必要としない受動素子です。マイクロフォンで検出素子は、固定されたメタルバックプレートから空隙によって分離されている振動板です。振動板と金属板コンデンサを形成します。ダイヤフラムは、準永久的な静電荷を有するエレクトレット材料で構成されています。音波は、振動板の二つのプレート間の距離を移動した場合

コンデンサの変化、静電容量の変化が生じ、エレクトレット振動板上に蓄積された電荷が固定されている、ので、小さな電圧 $V_{スピーチ}$ 生成され、生成された電圧は、ダイヤフラムにおけるスピーチの容積に直接比例します。

内部的には、コンデンサはJFETのゲートに接続されています。伝統的に、JFETは、共通ソース電圧増幅器として構成され、小さな電圧変化を増幅するために使用されます。しかし、私たちのアナログ後方散乱方式では、我々はとJFETという事実を活用します $V_{GS0}=0$ バイアス点は、トライオード領域で動作し、すなわち、トランスインピーダンス増幅器としてのインピーダンスに電圧を使用することができます。コンデンサからだから、電圧 $V_{スピーチ}$ (ドレインとソース端子間のインピーダンスを変化させます R_{DS}) JFETの。の面でJFETインピーダンス $V_{スピーチ}$

数学的に記述することができ、 $R_{DS} = \frac{R_{DS0}}{1 - \frac{V_{スピーチ}}{V_P}}$ 。ここに V_P ピンチオフ電圧であり、 R_{DS0} インピーダンスは、

ゲート端子におけるゼロ電圧のためJFETの。マイクロホンによって後方散乱信号を最大にするために、我々は、曲JFETのインピーダンスは、LC整合回路網を使用して、アンテナのインピーダンスを整合させます。(典型的な品質係数のために ≥ 4) マッチングネットワークの、我々は、アンテナから見たマイクロフォンのインピーダンスを表すことができ、

$$R_{\mu P} = \omega L \frac{1}{R_{DS}} = R_0 \frac{1 - \frac{V_{スピーチ}}{V_P}}{\quad} \quad (1)$$

ここに R_0 無スピーチ用のアンテナ端子のインピーダンスがあります。基地局は、単一のトーン信号を送信するように構成されています。さて、後方散乱理論[18]から、我々はマイクによって後方散乱信号が反射係数の観点で書くことができることを知っています $\Gamma = R_A - R_{\mu P}$

$R + R_{\mu P}$ として、

$$S_{backscat} \approx 1 + \Gamma = 2 R_A \frac{1}{R + R_{\mu P}} = \frac{2 R_A}{R + R_0} \frac{1 + \frac{V_{スピーチ}}{V_P}}{1 - \frac{V_{スピーチ}}{V_P}} \approx \frac{2 R_A}{R + R_0} \frac{1 + \frac{V_{スピーチ}}{V_P}}{1 - \frac{V_{スピーチ}}{V_P}} \quad (2)$$

の典型的な値について $V_{スピーチ}$ (ミリボルト) の数十は、我々は、音声の線形関数としての後方散乱信号を表現するために二項近似を使用しています。この後方散乱信号は、経路損失を受け、基地局によって受信されます。上式の第一項はDCであり、送信された音声に比例する第二項は、所望の信号です。所望の後方散乱信号、すなわち、マイクロホンの振動板で音声の音量に直接比例ターンにあるFETのゲートの電圧に比例する、音声、強い後方散乱信号を大声。基地局は、第一帯域雑音のうちの除去する3.4 kHzの帯域通過フィルタ300ヘルツ、続いてベースバンドにRF信号をダウンコンバートすることによって後方散乱されるRF信号から音声情報を復元します。後方散乱された音声信号を最大化するために、我々は設定しました $R_0 = R_A$ 、すなわち、私たちの曲一切入力された音声はありませんマイクのインピーダンス、アンテナのインピーダンスを一致させます。

上記アナログ後方散乱法を用いて、我々は継続的にオンボードADCおよびデジタル演算を動作させるための必要性を排除し、代わりに、基地局にこれらの電力を消費コンポーネントを委譲します。§4では、演算ブロック (MSP430マイクロコントローラ) のみ接続し、アンテナからマイクロフォンを切断するためのRFスイッチを制御するために必要であることを示し、このスイッチは0.22を消費します μ 追加の電力のW。我々は、アナログ後方散乱システムにおいて、無線信号は、第1バッテリーフリー電話の基地局から順方向の経路損失を受け、その後、バック電話機から基地局に注意します。このように、後方散乱信号が減衰して

D_A アナログ後方散乱音声の品質が劣化すると

基地局と携帯電話の間の距離、 D 、増加。

3.2 バッテリーフリー電話でのスピーチを受け

音声伝送のように、スピーチを受信するための従来のデジタルアプローチは、あまりにもパワー電池不要のシステムで使用するために高価です。DACとイヤホンドライバ続くデジタルダウンリンク通信リンクは、それが不可能バッテリーフリーシステムが動作できるようにすることかなりの計算および電力オーバーヘッドを追加します

連続。代わりに、私たちは[40]結晶ラジオからインスピレーションを取ると、電池不要の携帯電話に通話を送信するために振幅変調された信号を使用します。

我々のアプローチのアーキテクチャは、図3 (b) に示されています。音声信号 $S(T)$ +1と-1との間で変化します。基地局は、RF信号の振幅のアナログ音声を符号化します RF_{AM} 。振幅変調されたRF信号は、次のように書くことができます。 $RF_{AM} =$

$\frac{2(S(T) - 1)}{2} \{ ACOS(2\pi F_c T) \}$ どのメートル変調指数は、 F_c キャリアがあります
周波数と A RF信号の最大振幅です。我々は、DCバイアスを導入し、RF搬送波の振幅が0にするので (0とAとの間で変化することを確実にすることによって歪みを回避するために、2の因数によって音声信号を正規化 $\leq 1 + \text{メートル}$

$(1 - \text{メートル})$ $\frac{2(S(T) - 1)}{2} \leq 1$ 。送信されたAM信号は、2つの成分を有しています。メートル $\frac{2S(t)}{2}$ は $ACOS(2\pi F_c T)$ として
 $\frac{2}{2} ACOS(2\pi F_c \text{トン})$ 。第一成分は、信号の時変包絡線であり、携帯電話に送信音声に相当します。正弦波信号、送信音声に対応するRF信号の平均パワーは、音声であると仮定します $A_2 \text{メートル}_2$

$\frac{1}{4}$ $\frac{1}{4}$ どの $\frac{1}{4}$ 二つの独立の乗算の力があります
正弦波。AM信号の第二の成分は、RFハーベスティングのために利用可能であり、収穫電力は次式で与えられます。 $A_2(1 - \text{メートル})$
 $\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$

$\frac{1}{2}$ $\frac{1}{2}$ 変調指数を変化させることによりメートル 私たちは、RFのために利用可能な電力との間のトレードオフすることができます
収穫し、送信音声のパワー。5.1.2および§5.3では、我々はこのトレードオフを評価します。

電話で、前と同じように、我々は、それぞれ音声受信と他の動作モードで電話を構成するアンテナからのAM受信機を接続し、切断するRFスイッチを使用します。我々は、振幅変調 (AM) 受信機のような受動的な4段のダイオードベースのエンベロープ検出器を使用します。AM受信機は、キャリアをフィルタリングし、送信スピーチを回復するためにキャリアのエンベロープを追跡します。オーディオ変圧器は、任意のドライバを必要とせず、イヤホンに直接AM受信機をインタフェースするために使用されます。オーディオトランスは、低インピーダンスのイヤホンことを確実にするインピーダンス整合ネットワーク (18であります Ω) 包絡線検出器の出力をロードしません。私たちは、[5]出力音声の音量を最大化するために、高効率ネオジウムドライバーとモシのMythroイヤホンを使用しています。電話によって受信された音声信号のパワーを最大にするために、我々は、アンテナのインピーダンスにAM受信機のインピーダンスと一致するようにLC整合回路網を使用します。これは、アンテナの反射を最小限に抑え、順番にイヤホンで音声の質と量を最適化し、包絡線検出器によって受信電力を最大化します。

以前のように、純粋にアナログ手法を用いることにより、我々は、携帯電話上のADC及びデジタル演算の連続動作のための必要性を排除し、基地局にこれらの電力を消費コンポーネントを委譲します。代わりに、携帯電話は、音声を回復するために、エンベロープ検出器のような受動ゼロパワー素子を使用し、入力RF信号のエネルギーを使用して、イヤホンを作動させます。§4では、演算ブロック (MSP430マイクロコントローラ) は、アンテナからのAM受信機を接続し、切断するためのRFスイッチを制御する必要があることを示しています。スイッチは0.22を消費します μ 追加の電力のW。無線信号は、のように減衰するので1

$\frac{D_2}{D}$ どの D
バッテリーフリー電話と基地局との間の距離は、受信された音声の質と量が基地局とバッテリーフリー電話が増加するとの間の距離が劣化です。私たちは、§5.3で受信した音声の品質を評価します。

BATTERY-FREE PHONEの4設計と実装

図4は、バッテリーフリー電話のアーキテクチャを示しています。RF又はフォトダイオードハーベスタは、DC出力と電力携帯電話にそれぞれ入射RFまたは周囲光に変換します。電話が直接基地局からのアナログ音声を受信するためにパッシブマイクと振幅変調からアナログ音声を送信するためにアナログ後方散乱を使用します。それはまた、時には基地局との状態情報を通信するためのデジタル後方散乱を使用します。MSP430マイクロコントローラ (MSP430FR5969 [6]) 電話と基地局との座標の異なるモジュールを制御するために、デジタル状態機械を実装します。最後に、携帯電話は、ユーザーと対話するために静電容量式タッチボタンとLEDを使用しています。

表1は、バッテリーフリー電話のさまざまなコンポーネントの電力消費量をまとめました。電源管理を含み、電力ハーベスタは2.15を消費します μ DC電源のW。接続及びRFスイッチ

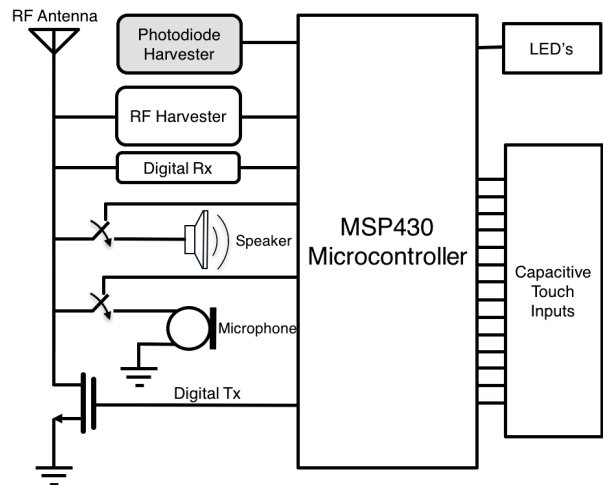


図4。バッテリーフリー電話のアーキテクチャ：電話は、DC電源にRFまたは周囲光に変換するハーベスターを使用しています。これは、直接基地局からのアナログ音声を受信するためにパッシブマイクと振幅変調からアナログ音声を送信するためにアナログ後方散乱を使用します。電話は、デジタル状態機械を実装し、携帯電話の異なるモジュールを制御MSP430マイクロコントローラを有しています。それはまた、ユーザと対話するために静電容量式タッチボタンとLEDがあり、時には基地局との状態情報を通信するためにデジタル後方散乱を使用します。

表1。バッテリーフリー電話の消費電力の概要

成分	消費電力
ハーベスタ & パワー・マネジメント	2.15 μW
MSP430マイクロコントローラ (LPM3)	0.86 μW
RFスイッチ	0.22 μW
バイアス & その他。	0.25 μW
トータル	3.48 μW

異なるモードの消費を切り替えることがアンテナからマイクとAM受信機を切断
0.22 μW .最後に、制御および状態機械を実装MSP430マイクロコントローラは、低電力モード (LPM3) で動作し、0.86の静止電力消費を有します μW .したがって、アナログとデジタルのアプローチの組み合わせを使用することによって、我々は数マイクロワットの電力パジェットにバッテリーフリー電話を操作する (3.48 μW) 。次のセクションでは、我々は電池不要の携帯電話のさまざまなコンポーネントの設計を記述します。私たちは、RFとフォトダイオード収穫の私たちの実装で始まります。次に、RFフォトダイオード駆動の携帯電話に音声送信と受信を最適化するための手法について説明します。最後に、我々は、ユーザーが携帯電話だけでなく、携帯電話の異なるモジュールを制御し、基地局と相互作用デジタルステートマシンと対話する方法について説明します。

4.1エネルギーハーベスティング

バッテリーフリー電話が基地局によって又は周囲光から送信されたRF信号のいずれかからエネルギーを収穫することができます。このセクションでは、我々は両方のアプローチのための収穫のデザインを提示します。RFエネルギーハーベスタは、低電圧DC電源[37]に入射するRF信号に変換する整流器から成ります。この電力は、マイクロコントローラおよびセンサの要件に合わせて1.8~2.4 Vの電圧を上昇させるDC-DCブーストコンバータに供給されます。周囲光から収穫するために、我々は、フォトダイオードを使用して、出力が既に低電圧DCであるので、我々は、1.8~2.4 Vの範囲まで電圧を増加させるためにDC-DCブーストコンバータを使用して、この電圧を昇圧します。昇圧コンバータの出力電力は、キャパシタに格納されています。

V. TALLAら[8]: 25。

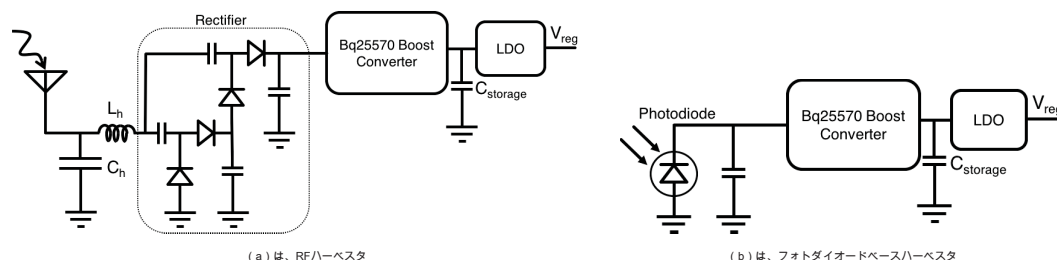


図5. ハーベスタトポロジ。RFハーベスタは、DC電源にRF信号を変換する昇圧コンバータ続く整流器を使用します。太陽ハーベスタは、DC電源に、フォトダイオードからの低電圧出力を変換する昇圧コンバータを使用します。

このようなバッテリーフリー電話などの収穫システムでは、そのようなRFまたは周囲光などの供給源から利用可能な電力は、有効電力消費よりも低くすることができます。私たちは、デューティ・サイクルの携帯電話を、携帯電話はこのような状況で動作できるようにするには。スリープモードとアクティブモード：バッテリーフリー電話は、2つの異なる動作モードがあります。スリープモードでは、携帯電話は、すべての操作を中止し、電源の最小限の量を消費する低電力モードに入ります。このモードでは、携帯電話は、排他的かつ効率的にエネルギーを収穫しています。電話が十分なエネルギーを収穫したとき、それは、音声を受信する音声を送信するか、基地局とのデジタル状態を通信するためにアクティブモードに遷移します。

デューティサイクルを実現するために、携帯電話は、bq25570チップ[2]の電圧監視回路を使用します。我々は、ストレージキャパシタにそれぞれ1.9 Vと2.4 Vに下側及び上側電圧閾値を設定します。蓄積コンデンサの電圧が1.9 Vを下回ると、携帯電話は、電力を最小化した状態を保持するためにスリープモードに入ります。電圧は2.4 V上側電圧閾値に達すると、それは動作のアクティブモードに切り替わり、低ドロップアウトレギュレータ (LDO) を含む電力ハーベスタは2.2の総電力を消費します μW 。

4.1.1 RF電力を供給電話。 RF給電電話は直流電力にRFに変換する2段のデイクソンチャージポンプ整流トポロジを使用します。我々は、[9]効率的に915MHzのISM帯域内の電力を収穫するスカイワークス社からSMS-7630ショットキーダイオードを使用します。整流器は、LC整合回路網を介してアンテナに接続されています。整合ネットワーク ($L_H=11\text{ NH}$, $C_H=6.2\text{ PF}$) ハーベスタの入力でRF信号を最大化するアンテナのインピーダンスに整合させる整流器の入カインピーダンスを変換します。整流器の低電圧DC出力は (§4.1に記載されている) ブーストコンバータに供給されます。我々は、[37]のインピーダンス整合を最適化するように調整するためにDC-DCコンバータの入カインピーダンスをTIチップの最大電力点追従 (MPPT) モードを利用します。具体的には、300 mVのにブーストコンバータのMPPT基準電圧を設定します。最後に、昇圧コンバータの出力は、直接携帯電話に別の回路に電力を供給するために使用される安定した電源レールを、生成する低ドロップアウト (LDO) レギュレータによって調節されます。私たちの実装で使用されるRFエネルギーハーベスタは-13.4 dBmの感度まで (コールドスタート) を動作することができます。これは、32フィートの最大動作距離に変換されます。

RF給電電話において、動作のアクティブモード中、アンテナは、後方散乱マイクロフォンとAM受信機とRFハーベスタと他のコンポーネントとの間で共有されます。このように、アンテナは、RFエネルギーハーベ스팅及び他の機能の性能低下につながる複数の要素によってロードされます。アクティブモードでは、電話で収穫電力が低減され、携帯電話は、アンテナから他のすべてのブロックを切断することにより、デューティ・サイクルに強制され、専用の電源を収穫します。§4.2.1に、我々は動作のアクティブモードでRF電力を供給電話の性能を最適化する技術が記載されています。

4.1.2 フォトダイオード駆動の携帯電話。 我々は、周囲光[12]から電力を収穫するために私達のトランスデューサとしてビシエイ社によってVEMD5060X01シリコンPINフォトダイオードを使用します。私たちの最低限の目標は、継続的に、典型的な家庭やオフィスで見つかった500ルクスの周囲光の設定、バッテリーフリー電話を動作させることです。我々は、少なくとも15を生成し、並列に接続されたフォトダイオード15を使用します μW 、周囲光がより大きい又は500ルクスに等しいDC-DCコンバータの冷間始動に必要な最小パワー。各VEMD5060X01フォトダイオードは、7.5ミリメートルのアクティブ領域を有します 2

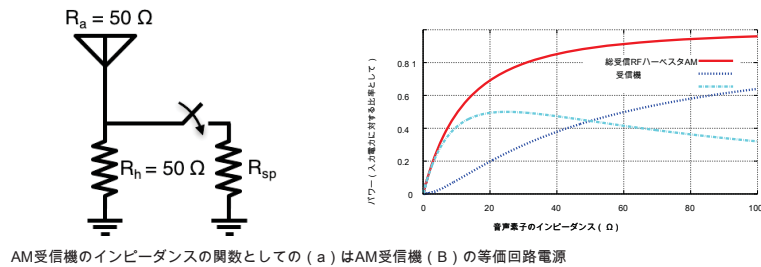


図6. RF電力を供給電話で音声受信を最適化します。我々は、RF電力供給電話機の音声受信に最適なマッチングネットワークを設計するためのAM受信機の等価回路を解析します。

そして私たちの実装で使用する組み合わせたフォトダイオードは1.1センチメートルの有効面積を持っています²。これは、500ルクスの光の設定でバッテリーフリー電話の連続運転には十分でした。

私たちは、bq25570エネルギー・ハーベスティングチップにフォトダイオードを接続してください。収穫周囲光を効率的に最大化するために、我々はbq25570チップの最大電力点追従 (MPPT) モードを使用して、フォトダイオードの開回路電圧の80%にMPPT基準電圧を設定する[2]。前と同じように、昇圧コンバータの出力が安定した電源レールを生成する低ドロップアウト (LDO) レギュレータによって調節されます。

バッテリーフリー電話の4.2最適化スピーチのパフォーマンス

私たちは、フォトダイオードとRFバッテリー駆動フリーの携帯電話に伝送し、音声の受信を最適化するための手法について説明します。

4.2.1 RF電力を供給電話。 RF給電電話において、単一のアンテナは、エネルギーハーベスティング、音声伝送、ならびに音声受信のために使用されます。従って、RFエネルギーハーベスティングの性能や入射RF信号から採取することができるエネルギーの量は、電話の動作モードの関数です。具体的には、携帯電話は、ほとんど (数ミリ秒持続するデジタル通信と比較して) 音声送受信モードでの時間を費やしています。そこで、我々は、これらの2つのモードを最適化するために焦点を当てます。

音声伝達。 スピーチを送信するには、RF電力を供給電話は後方散乱マイクロにアンテナを接続しています。しかし、アンテナは、既にRFハーベスターに接続され、それが収穫に平行に後方散乱マイクロを見えています。したがって、入力電力がハーベスターと後方散乱マイクロフォン間で分割されます。この影響RFハーベスターと後方散乱マイクロの両方のパフォーマンス。携帯電話から基地局への後方散乱マイクロのリンクは (速く減衰しているので α_1

バック§3.1で行わ分析しようと、今RF給電電話アンテナから見たインピーダンスは、ハーベスター (アンテナインピーダンスに整合) 及び後方散乱マイクロフォンの並列結合です。前から同じ二項近似式を用いて、RF動力アナログ後方散乱マイクロフォンからの信号は、のように書くことができ、

$$S_{\text{backscatter}} \approx \frac{2 R_A}{R + R_{\text{HP}} \parallel R_A} \approx \frac{2}{R + 2 R_0} \left[\frac{R_A R_0}{R + R_0 + V_{\text{スピーチ}} V_P} \right] \quad (3)$$

我々は設定RF電力を供給電話からの後方散乱のスピーチを最大化するために、 $R_0 = R_A$ (マイクの $L_{\mu P} = 15 \text{ NH}$, $C_{\mu P} = 0 \text{ PF}$) とし、アンテナの半分のインピーダンスを整合するために何も入力された音声はありません。フォトダイオード給電後方散乱マイクロフォンと比較した場合によりRF収穫の追加の負荷に、RF給電後方散乱マイクロフォンの性能が3dBだけ減少させます。

スピーチレセプション。 音声を受信するために、RF電力を供給電話は、AM受信機にアンテナを接続しています。RFハーベスターは、常にアンテナをロードするので、アンテナの入力電力は、エネルギーハーベスターとAM受信機との間で分割されます。この影響RFエネルギーハーベスティングのパフォーマンスだけでなく、スピーチ

25:10・V. TALLAら。

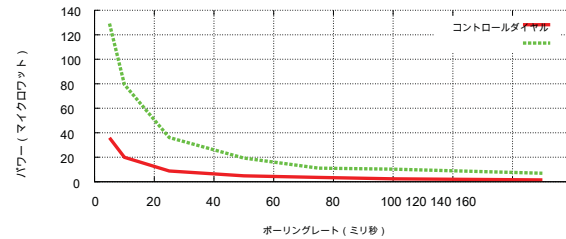


図7. 静電容量式タッチボタンの消費電力。

携帯電話で受信しました。我々はこのシステムを最適化する方法を理解するために、図6 (a)ここに示した等価回路図を考えます $R_{時間}$ RFハーベスタのインピーダンスであり、 R_{SP} AM音声レシーバのインピーダンスです。入力電力の割合としてアンテナで受信された総電力は、アンテナのインピーダンスの関数であり、のように書くことができ、

$$P_{合計} = \frac{[1 - |\Gamma|^2]}{R + R_{時間} \parallel R_{SP}} \quad (4)$$

ハーベスタとAM音声受信機によって受信された電力は、として表すことができます。

$$P_H = P_{トータル} \frac{R_{時間} \parallel R_{SP}}{R_{時間}} \quad (5)$$

$$P_{SP} = P_{トータル} \frac{R_{時間} \parallel R_{SP}}{R_{SP}} \quad (6)$$

合計ハーベスタで電力を受信し、AM受信機の入ラインピーダンス範囲のAM受信機は、図6 (b) に示されています。アンテナとハーベスタの両方のインピーダンスは50であります Ω (最適な収穫のためにマッチしたパワー)。プロットは、AM受信機のインピーダンスが増加すると、合計が電力増加を受信したことを示しています。AM受信機50と平行です Ω ハーベスタ、AM受信機のインピーダンスが増加するように、アンテナ50に近いインピーダンスを見るので Ω 、これは、総受信電力を最大化します。しかし、AM受信機によって受信された電力は、25の最大 (入力電力の50%) であります Ω しかし、AM受信機のこのインピーダンスのために、RFハーベスタは、入力電力の20%を受け取ります。(後方散乱アップリンクが速く減衰するので) 私たちの携帯電話は、受信した音声のパフォーマンスによって制限されていないので、我々は、効率的なRFエネルギーハーベスティングのための音声受信のパフォーマンスをトレードオフ。具体的には、50 AM受信機のインピーダンスを設定します Ω 、これは、入力電力の88%を受信し、収穫し、AM受信機との間で均等に (44%ずつ) に分割されることを確実にします。

RF給電電話が同時に電力を収穫し、振幅変調信号から音声を受信しています。だから、フォトダイオード搭載の携帯電話とは異なり、電力収穫し、受信した音声の品質との間にトレードオフが存在します。基地局は、変調指数の値を設定することにより、トレードオフを制御することができ、メートル。の低い値メートルより高い一方、音声受信のために最適ですメートル利用可能なRFパワーを増加させます。§5では、設定することによって、このトレードオフを検討しますメートル0.2、0.5および1の同時RFエネルギーハーベスティングと音声受信を評価します。

4.2.2 フォトダイオード駆動の携帯電話。 フォトダイオード給電電話では、エネルギーハーベスティングは、他のすべてのRFの機能から切り離されます。したがって、音声送受信分析及び§3に記載された技術をそのまま適用可能です。具体的には、アナログ後方散乱マイクロフォンのマッチングネットワークがために設計されています $R_S = R_A$ 。フォトダイオード給電電話機はRFから収穫しないので、基地局が設定することにより、音声受信のための振幅変調を最適化 $M = \text{電話1}$ 、我々は (AM受信機のマッチングネットワークを設計します $L_R = 7.5 \text{ NH}$, $C_R = 6.8 \text{ PF}$) AM受信機の入力で電力を最大化する電話機のアンテナと一致します。

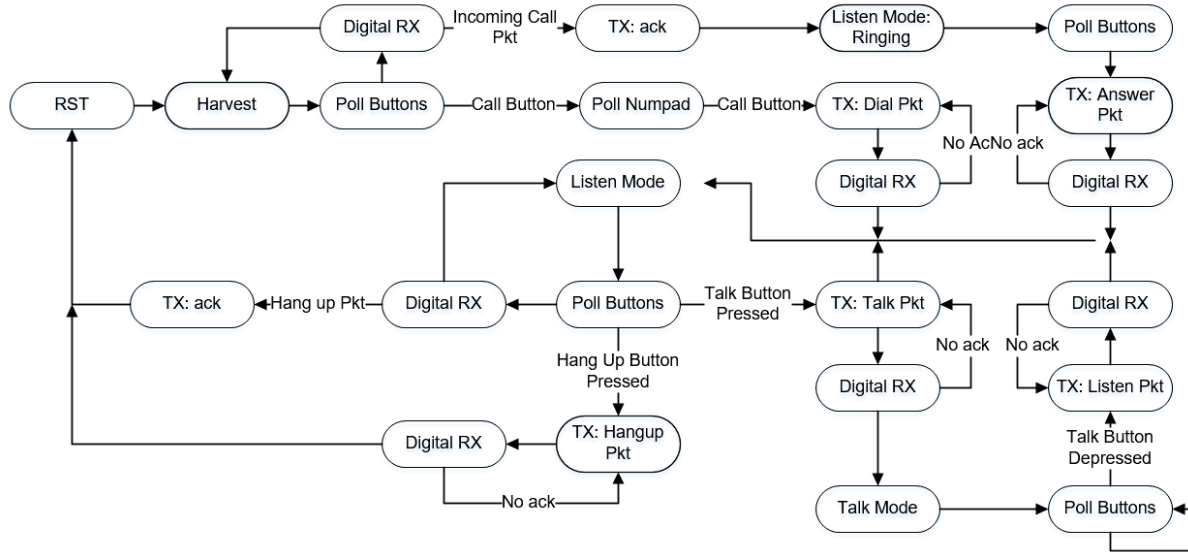


図8. バッテリーフリーの携帯電話のステートマシン

4.3 ユーザーインターフェース

携帯電話は、静電容量式タッチボタンとLEDのユーザーのための対話を使用しています。ユーザーは、電話番号をダイヤルし、静電容量式タッチボタンを使って電話を制御します。図2(b)に示すように、携帯電話は、ダイヤルするための数字0-9、*及び#12のためのボタンと2つのボタンを有しています Aそして B制御のため。

ユーザーの入力に対応するために、我々は継続的にポーリングし、静電容量式タッチ入力にMSP430マイクロコントローラの静電容量式タッチコントローラを使用しています。ポーリングが電力を消費するので、対話の消費電力と速度の間の基本的なトレードオフが存在します。私たちは、電力バジェットのための最適なレートを決定するためにさまざまなポーリングレートで静電容量式タッチボタンの電力消費量を評価します。

私たちは、異なる速度でボタンをポーリングするために携帯電話を設定して、電力を測定するために、ソース測定ユニット (SMU) を使用しました。図7は、ボタンの二つのクラスのための (現在のスリープ・モードを含む) MSP430の消費電力を示す: 対照 (ポーリングのみ Aそして B) そしてダイヤル (投票全14個のボタン)。予想通り、ボタンのポーリング数が少なく、低消費電流になります。コントロールボタンは、コールの長さ全体にわたって使用されている間ダイヤルのみ、コールの最初に一度起こるので、これは便利です。

さらに、我々は電源がポーリングレートに反比例することに注意して約50ミリ秒のポーリングレートを平ら。これは、電力のマイクロワットを消費しながらユーザーとの対話に妥当な応答時間を維持するために、バッテリーフリー電話することができます。

基地局と4.4 デジタルステートマシンとの相互作用

電話を送受信するために、電池不要の携帯電話は、その動作状態や接続状態を管理するために、基地局と対話します。基地局と電池不要の携帯電話間のシステム慎重な連携の極めてエネルギー制約自然に滑らかでインタラクティブな通話体験を確保するために維持しなければなりません。図1に示すように、この調整は、バッテリーフリー携帯電話上の状態機械によって処理される。8。

コールのセットアップ: ない通話中に最初は、電池不要の携帯電話は、低消費電力モードで待機します。ユーザーが通話を開始したり、着信を通知する基地局のためにするのを待っている間これは、収穫エネルギーに電話することができます。ユーザーが開始または着信に応答しているかどうかを検出するために、携帯電話は、定期的に「コール」ボタンをポーリングし、着信データバケットをリッスンするデジタルRXモードに入るようにスリープモードから復帰しました。

25:12・V. TALLAら。

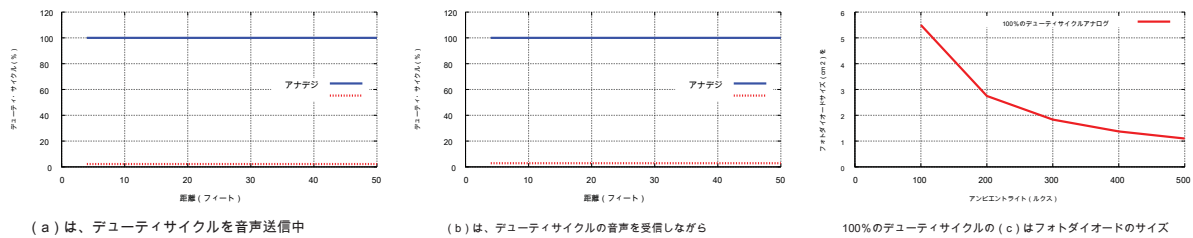


図9. フォトダイオードエネルギーハーベスティング。プロットはphotodiodes.Weを使用して500ルクスの周囲光から収穫エネルギーで実行されている音声を送受信するためのバッテリーフリー電話のデューティサイクルを示し、周囲光条件の関数として、連続運転のために、フォトダイオードの最小サイズを示します。

ユーザーが通話を開始するには、「呼び出し」ボタンを押すと、電話の遷移は状態をダイヤルする場所、それが世論調査のボタンをユーザーが再び「コール」ボタンを押すまで。その後、ダイヤルされた電話番号を基地局に後方散乱を用いたデジタルパケットを送信し、ACKを待機するデジタルRXモードに入ります。(常にRXモードでの)基地局は、callpacketを受ける電話番号を解析し、呼を設定します。コールが鳴っていると、それは「リッスンモード」に移行電話にACKを送信します。

着信の場合、基地局は、着信を検出し、それを通知する携帯電話にデジタルダウンリンクパケットを送信します。電話は基地局にACKを送信し、「リッスンモード」に移行します。

進行中のコール：呼の進行中に、基地局は、音声送信/受信、デジタル通信や通話を終了間の遷移を管理します。すぐにダイヤルするか、着信コールに接続した後、電話は「リッスンモード」発言に入ります。「リッスンモード」で開始することにより、ユーザーは着信や他のラインの答えにリングを聞くことができるようになります。システムの半二重性質のために、ユーザーが同時に話すことと聞くことができません。携帯電話のデフォルトはモードを聞くために「話」ボタンが開催されている間のみ、アップリンクの音声を送信：私たちは、スキームを「プッシュトーク」を使用します。これは、バッテリーフリー電話が通話中に相手の上に話をし、それらを中断することができることになることに注意してください。しかし、通常の電話とバッテリーフリー電話間の通話の非対称性を与え、

「リッスンモード」にある間、基地局はアナログ変調と電話定期的にポーリングコントロールボタンとデジタルRXを用いて音声を送送します。通話中に話すことは、前述の「プッシュトーク」を使用して達成されます。ユーザーは「トーク」ボタンを押すと、電話が話を聞いてから、モードの変更を要求する基地局へのデジタルパケットを送信します。それが受け取るとACKの後、携帯電話は、マイクと後方散乱スピーチをオンにします。それは「話」ボタンが解放されたことを検出すると、それは「リッスンモード」への切り替えを要求する基地局に別のパケットを送信し、それがACKを受信したときにアンテナにスピーカーを接続します。

通話の終了：コールは、2つの方法で終了することができます。利用者は、携帯電話は通話に終了するように要求基地局にデジタルパケットを送信するために、「ハングアップ」ボタンを押すことができます。それは肯定応答を受信した後、元の低電力状態に電話遷移は別のコールを待っています。他のラインは、最初の電話を切った場合あるいは、基地局は、接続の終了を処理し、携帯電話にハングアップパケットを送信します。携帯電話は、パケットを認識し、低電力モードに入ります。

5評価

ここでは、様々な動作モードでは、当社のバッテリーフリー電話の性能を評価します。特に、我々は、これらの携帯電話は、使用時には、ほとんどの時間のために動作するモードであるため、それが音声を送信または受信しているsystemwhileのエネルギーハーベスティング能力を評価することから始めます。次に、我々はバッテリーフリー電話で送信および受信できる音声の品質を定量化します。

基地局の実装。我々は2つのUBX-40 RFドーターボード[10、11]とUSRP X300のソフトウェア無線基地局との私達のを実装します。USRPの出力電力はRF5110 RF電力増幅器を使用して30 dBmに設定されている[7]。これは、ISM帯域でFCCにより許可される最大送信電力の範囲内です。私たちは、バイスタティックを使用します

25:13・バッテリーフリーの携帯電話

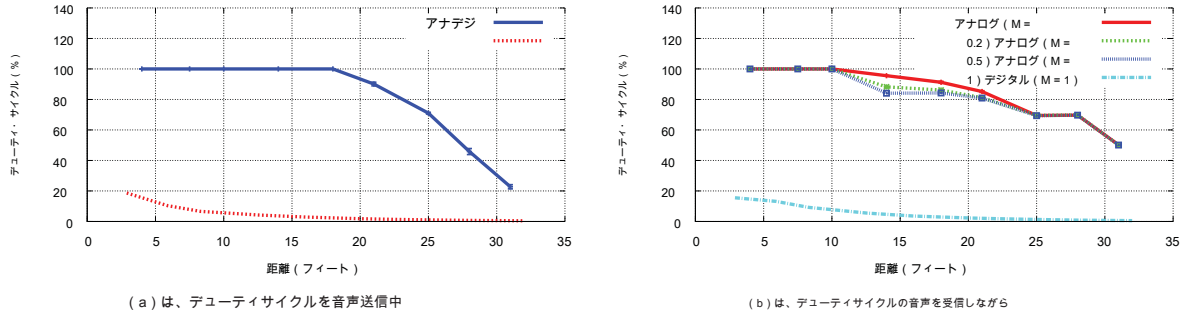


図10。RFエネルギーの収穫。入射したRF信号から収穫エネルギーに実行中のプロットは、アップリンク及びダウンリンク通信のためのバッテリーフリー電話のデューティサイクルを示します。

私たちの後方散乱基地局用レーダー構成[28, 39]。基地局は6 dBiの円偏波アンテナに第ドーターボードを使用して915 MHzで送信します。1. 5フィート離れた別の6 dBiのアンテナが受信アンテナとして使用され、受信機として構成された第二UBX-40ドーターボードに直接接続されています。二つの同一のパッチアンテナは、グラウンドから3フィートの高さに配置されています。

5.1環境発電 (エナジーハーベスト)

私たちは、RF信号とフォトダイオードを使用して、当社のバッテリーフリー電話の収穫能力を評価します。

5.1.1フォトダイオード収穫。 §4.1.2に記載されているように、フォトダイオードを使用して収穫エネルギーの主な利点の一つは、エネルギーハーベスティングは、携帯電話の他のRF通信機能から分離されていることです。このように、私たちのバッテリーフリー電話の低動作電力を考えると、フォトダイオード・収穫電話は限り十分な周囲光があるとして、連続的に、または非常に高いデューティ・サイクルで動作することができます。これを評価するために、我々は、オフィス環境では、当社のフォトダイオード収穫機を配置し、利用可能な電力を測定します。

私たちは、音声伝送モードで電話機を設定し、約500ルクスの周囲光強度でオフィス空間でのプロトタイプを配置します。私たちは、携帯電話の動作状態を監視するために、NI MyDAQを使用しています。携帯電話は、音声受信モードであるとき、私たちは、同様の実験を行っています。図9のプロットのデューティサイクル、すなわち、電話が基地局とフォトダイオード給電電話との間の距離の関数として、アクティブモードで費やす時間のパーセンテージ。比較のために、我々はまた、音声処理するためにADC、DACとマイクロコントローラを使用し§1に記載のデジタル設計によって必要とされるデューティ・サイクルをプロットします。プロットは、電話機がアナログ音声を受信する音声と振幅変調を送信するためにアナログ後方散乱を使用する場合、フォトダイオード給電電話は500ルクス周囲光設定で、100%のデューティサイクルで連続的に動作することができることを示しています。しかしながら、比較して、完全にデジタル設計は、2.5%より低いデューティ・サイクル率を持っています。、携帯電話は、周囲光から電力を収穫しているので、そのデューティサイクルは、基地局からの分離とは無関係です。最後に、フォトダイオード電話機は異なる照明条件の下で動作することができる方法を示すために、図9 (c) は、100〜500ルクスの光の下で音声を送受信するためのアナログアプローチを使用しながら、100%のデューティサイクルを保証するために必要なフォトダイオードの大きさをプロット条件。私たちも、100ルクスの最悪の条件の下で、我々はごく5.5を必要としていることがわかります フォトダイオード電話機が異なる照明条件の下で動作することができる方法を示すために、図9 (c) は、100〜500ルクスの光条件下で音声を送受信するためのアナログアプローチを使用しながら、100%のデューティサイクルを保証するために必要なフォトダイオードの大きさをプロットしたものです。私たちも、100ルクスの最悪の条件の下で、我々はごく5.5を必要としていることがわかります フォトダイオード電話機が異なる照明条件の下で動作することができる方法を示すために、図9 (c) は、100〜500ルクスの光条件下で音声を送受信するためのアナログアプローチを使用しながら、100%のデューティサイクルを保証するために必要なフォトダイオードの大きさをプロットしたものです。私たちも、100ルクスの最悪の条件の下で、我々はごく5.5を必要としていることがわかります *cm2* アクティブ領域のフォトダイオード。

5.1.2 RF環境発電 (エナジーハーベスト)。入射したRF信号から電話収穫電力は、アンテナが同時にRFエネルギーハーベスティングと、音声の送受信などの他の機能の両方のために使用されます。このように、RFエネルギーハーベスティングの性能は携帯電話の動作モードの関数です。私たちは、音声の送受信がRFエネルギーハーベスティングのパフォーマンスに与える影響を評価します。

RFエネルギー・ハーベスティングは、音声を送信中。 我々は継続的にアクティブモードの音声を送信するために、バッテリーフリー電話を設定します。電話は、ストレージキャパシタに十分なエネルギーを有しているときはいつでも具体的には、アンテナに後方散乱マイクを接続し、バック基地局へ音声を送信します。私たちは、セット

25:14•V. TALLAら。

部屋の一角にある基地局と直線的に離れてからのRF電力を供給バッテリーフリー電話を移動します。私たちはスタンドに携帯電話のPCBのプロトタイプを配置し、実験中に基地局のパッチアンテナに電話PIFAアンテナを平行に向けます。基地局は、アナログオーディオ後方散乱及びRFエネルギーハーベスティングの両方に使用される単一トーン信号を送信する設定です。私たちは、携帯電話の動作状態を監視するために、NI MyDAQを使用しています。基地局とRF電力を供給電話間のすべての距離では、我々はそれがスリープモードに比べてスピーチを送信し、すなわち、時間の割合をアクティブモードでの携帯電話の滞在時間の割合を測定します。図10 (a) は、携帯電話が基地局とRF給電電話との間の距離の関数として、アクティブモードで費やす時間の割合、すなわち、デューティ・サイクルをプロットします。比較のために、我々はまた、ADCとスピーチを処理するためのマイクロコントローラを使用したデジタル後方散乱設計により必要なデューティ・サイクルをプロットします。プロットは次のことを示しています。

- それはRF電力を供給電話と基地局との間の18フィートまでの音声を送信している間に電話が100%デューティ・サイクルで動作します。これは、RF電力を供給電話が継続的に中断することなく、スピーチを送信できることを意味します。後方散乱マイクロフォンによってアンテナのローディングに起因する損失にもかかわらず、収穫電力が電話の総消費電力量よりもさらに大きく、従って、RF電力供給電話が連続無中断で音声を送信することができるからです。
- 基地局は、直線距離とともに減少に18フィートを超えると、電話と基地局との間の31フィートまでの距離を、時間の割合は、電話音声を送信することができます。少ない電力で大きな距離でアンテナで入手可能だからです。具体的には、18フィートを超えて、アンテナが後方散乱マイクロフォンによってロードされる収穫電力が電話の総消費電力量未満です。蓄積コンデンサの電圧がしきい値を下回るときはいつでもこのように、携帯電話は、アンテナから後方散乱マイクロフォンを切断し、効率的に収穫RF電力のスリープモードに移行します。十分なエネルギーが蓄積容量で提供されていたら、それはスピーチを送信するために戻って遷移します。一つのアプローチは、連続的なストリーミングの最小時間周期をサポートして、収穫のパワーに電話を待つために、ストレージ容量のサイズを選択することです。また、追加のための

0.2 μ Wは、代わりに、連続音声のストリーミング、RFスイッチは、基地局によって再構成することができるサンプリングされたアナログ音声を送信するために8kHzで切り替えることができます。のみサンプリングされた値を送信することにより、マイクロフォンは、音声及びアンテナを後方散乱された時間の割合を減少ロードされます。これは、デューティ・サイクルの要件を緩和し、また、利用可能なRFパワーを増加させます。例えば、時間の五分の一のための高8kHzのサンプリングクロックは、今も31フィートの最大動作距離で、マイクを後方散乱マイクロフォンだから5倍に送信し、利用可能なRF電力である時間を減少させます100% (20%*5) デューティサイクルで送信します。我々は比較して、完全にデジタル設計が18フィートを超える距離で3%より低いデューティ・サイクル率を持っていることに注意してください。

RFエネルギーハーベスティングのスピーチを受けながら。 次に、我々はアンテナに私たちの音声包絡線検波回路を接続するアクティブモードの音声を受信するRF電力を供給電話機を設定します。電話機がアクティブモードにある場合、基地局は、§3.2に記載された振幅変調方式を用いて音声を送信します。しかし、電話遷移スリープモードへ、基地局は、携帯電話電力を効率的に採取するための単一のトーン信号を送信します。我々は、3つの異なる振幅変調インデックスのシステムの性能を調べる：0.2、0.5および1。我々は再び電話の動作状態を監視するNI MyDAQを使用します。私たちは、基地局とRF電力を供給電話の間の距離を変えると電話が音声を受信アクティブモードにとどまる時間の割合を測定します。図10 (b) は、基地局とRF給電電話との間の距離の関数として、デューティサイクルをプロットします。

- 携帯電話は、10フィートの距離まで100%デューティ・サイクルで動作します。具体的には、携帯電話は、連続的に音声を受信してのみRF電力を用いてイヤホンを作動させることができます。携帯電話は、音声を受信している場合、基地局は、と比較して低い電力を有する振幅変調された信号を送信しているので、音声を受信するため、100%のデューティサイクルの作動距離は、音声の伝送よりも小さいです

距離 (フィート)	RFパワー (PESQスコア)	フォトアコースティックパワー (PESQスコア)
5	3.4	3.4
10	2.3	2.6
15	2.1	2.1
20	1.5	1.5
25	1.4	1.6
30	1.2	1.4
35	-	1.5
40	-	1.3
45	-	1.4
50	-	1.2

インタラクティブ、モバイル、ウェアラブルとユビキタス技術、巻上ACMの議事。1、第2、第25条発行年月：2017年6月。

25:16・V. TALLAら。

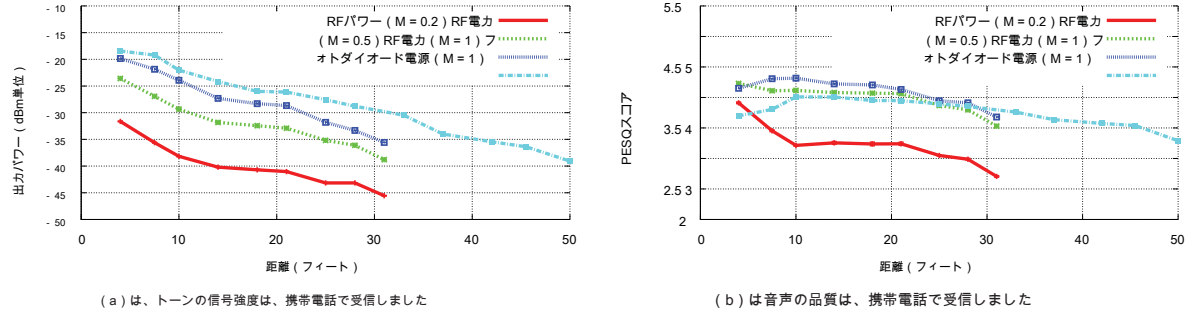


図12. 電話でのスピーチ受信。プロットは、携帯電話で受信した音声の信号強度と品質を示しています。

図はまた、RF給電プロトタイプと比較した場合、受信された音声の信号強度は、フォトダイオード給電電話の場合には、より高い3 dBにあることを示しています。フォトダイオード動力RFフロントエンドは、RFエネルギーハーベスタによってロードされず、結果として、後方散乱された音声信号は、より高い信号強度を有し、これは§3.1に記載理論とシステム設計と一致します。

- RF給電電話は、RFエネルギーハーベスタの最大動作範囲である31フィートまで動作することができます。フォトダイオードを使用して電源を入れたときただし、バッテリーフリー電話は、我々の実験を行っている部屋の長さだった50フィートを越えた距離で動作させることができます。
- 図11 (b) にプロットし PESQ バッテリーフリー電話と基地局間の距離の関数として、受信した音声の。距離が増加すると、受信した音声低下の信号強度は、受信された音声の品質を低下させ、従ってその PESQ 音声信号の品質の低下を反映して、減少させます。また、この図は、フォトダイオード駆動の携帯電話で受信した音声の品質は、RF電力を供給電話のそれよりもわずかに高いことを示しています。ザ PESQ 基地局で受信した音声の全ての評価を動作距離のための1よりも常に大きいです。太陽電池式携帯電話は、少なくとも50フィートまで基地局からの音声を送信することができる一方、したがってRF給電電話31フィートまで良好な音声を送信することができます。

電話での5.3スピーチレセプション

最後に、我々は、音声信号の品質は上記と同じメトリックを使用して、バッテリーフリー電話で受信し評価します。私たちは、音声を受信する音声送信モードでの基地局とバッテリーフリー電話を設定します。基地局は915 MHzで振幅変調を用いて音声信号の二組、1.75 kHzでシングルトーンと第2の音声を送信します。私たちは、3つの異なる振幅変調指数のための実験を行います。

0.2、0.5および1。我々は、バッテリーフリー電話機のイヤフォンによって受信された音声信号を記録するNI MyDAQを使用します。私たちは、バッテリーフリー電話と基地局間の距離を変化させ、信号強度をプロットし、PESQ異なる変調インデックスの図12における受信信号の。信号強度は、ヘッドホンによって受信された音声の音量の指標であり、受動駆動回路は、人間の聴覚のためのイヤホンを作動させるのに十分な力を発生させることができるかどうかを示します。我々は両方の電源が入RFとフォトダイオード搭載の携帯電話のための実験を行います。プロットは次のことを示しています。

- 図12 (a) は、バッテリーフリー電話で受信した音声の信号強度は、距離が増加するにつれて減少することを示しています。後方散乱信号は、経路損失を経験するためです α_1 D_2 どこ D それはバッテリーフリー電話と基地局間の距離。プロットはまた、信号強度が変調指数に伴って減少することを示しています。ヘッドホン用の受動ドライバの出力に小さい振幅変化及び低消費電力が低い変調指数をもたらします。
- フォトダイオード給電電話は、同様の動作距離にRF電力を供給バージョンと比較してより高い信号強度を有します。フォトダイオード駆動のバージョンのRFフロントエンドではないからです

RFエネルギーハーベスタがロードされ、従って、より高い出力電力を生成します。私たちは、RF電源が入っていることに注意してください携帯電話は31フィートまで動作することができます - これは、RFエネルギーハーベスタの最大動作範囲です。フォトダイオード駆動の携帯電話は、他の一方で、我々は実験を行っている部屋の長さだった50フィートを超えて動作距離でスピーチを受け取ることができます。最後に、

-45 dBmのは、電池不要の携帯電話で受信した音声の最小電力でした。私たちは、この力は、人間の聴覚のために必要な音量でイヤホンを作動させるのに十分であったことを確認するために、5人の若く健康なヒト被験者で、この信号レベルをテストしました。

- 図12 (B) ことを示しています *PESQ* 携帯電話で受信した音声の、バッテリーフリー電話と基地局間の距離が増加するように大部分が減少します。しかし、非常に小さな作動距離と1の変調指数のために、入力電力が大きい場合、音声の品質の小滴があります。これは、受動的エンベロープ検出器はわずかに受信された信号の品質を劣化させる、より高い電力レベルで信号を歪ませるという事実によって説明することができます。
- 前述のように、フォトダイオード搭載の携帯電話で受信した音声の品質は、RF電力を供給電話のそれよりも高いです。我々はまた、ことに注意してください *PESQ* 受信した音声のすべての動作距離に対して1よりもかなり大きいです。RFは、電源投入時やフォトダイオードを使用して、少なくとも50フィートの電源を入れたときにそのため、バッテリーフリー電話は、31フィートまでのスピーチを受け取ることができます。

次のリンクで見つけることができます異なる動作距離とPESQs用バッテリーフリー電話で受信した後方散乱音声と音声のオーディオクリップ:

<https://youtu.be/ct 9JgpZWGA>

5.4バッテリーフリー電話とSkypeの相互作用

私たちは、通常の電話網で電話を呼び出すためにVoIP機能を活用します。具体的には、基地局の接続状態をprogrammaticallymanageと電池不要の携帯電話に透過的に音声を送信するためにSkypeのAPIを使用しています。Skype4Pyプロジェクトは、Skypeクライアントを制御するコマンドを発行するAPIを公開しています。私たちは、着信コールを受けるダイヤルアウト、および停電時に保留にユーザーを配置するためにそれを使用します。私たちはネイティブのSkypeクライアントを制御しているので、しかし、私たちの基地局のソフトウェアから/へのオーディオバッファを読み書きするためのAPIはありません。この問題を回避するために、私たちは私たちがGNURadioオーディオソースにSkypeやパイプ、この仮想オーディオデバイスのデフォルトのスピーカーを設定することができますLinuxの仮想オーディオデバイスを作成します。同様に、我々はまた、SkypeクライアントにGNURadioシンクを形成するパイプのオーディオへの仮想マイクを作成します。

6関連研究

私たちの仕事は、電池不要の携帯電話を有効にするには、電力収穫と後方散乱通信を使用しています。このセクションでは、これらの分野に関連する作業について説明します。

電力収穫。 太陽、圧電および熱電収穫も電池不要のシステムを開発するために研究されてきました。しかし、携帯電話のバッテリーを充電することができますソーラーベースのシステムでは、[8] [33]の追加と、多くの場合、大型で高価な太陽電池が必要です。また、圧電および熱電デバイスは、ユーザビリティ[29]を制限するのに十分な振動や温度勾配が利用可能であるシナリオでのみ動作することができます。

遠距離場RF電力供給上の初期の研究は、電力の小さな量を示している (1 - 100 μW) が収穫できます

RFID信号から加速度計を動作させるために[35]、温度センサー[35、43]、そしてカメラ[27]。しかし、既存のデジタル・アーキテクチャの制限により、すべての前述のRFは、電源システム、それらの動作をサイクリング重く義務。最近、研究者らはまた、電力の同様の量が、周囲TV信号[26、34、42]、基地局[32、36、41]とのWi-Fi[37、38]からセルラ送信から回収することができることを示しています。915 MHz帯における当社の収穫のアプローチは、これらのアプローチに相補的であり、我々は複数組み合わせることができます

25:18•V. TALLAら。

より多くの電力を収穫するための915メガヘルツ、2.4GHz帯と5GHz帯[30]を含むISMバンド。しかし、利用可能な電力は、継続的に当社のアナログ設計を必要と既存のデジタルシステムを動作させるにはまだ不十分です。最後に、私たちの仕事は、また、[25]電力供給と情報伝達をトレードオフ同時無線情報と電力伝達 (SWIPT) の最近の取り組みに関連しています。代わりに、本研究では、同時に収穫電力及び送信/アナログ音声を受信し、連続バッテリーフリー携帯電話の操作を可能にするために、インピーダンスマッチングを用いて2つのモード間のトレードオフを最適化します。

後方散乱通信。 私たちの仕事は、16 [RFIDを使用して、後方散乱通信に関する最近の進展に関係しています

19、44]、TV [26、31]、のWi-Fi [21、22、24]、ジグビー[21]、ブルートゥース[15、47]およびFM [13]信号。我々の仕事に最も近いは、ブリンク [45]及びデュー[14]として計算RFIDシステムの作業です。これらのシステムは、デューティサイクルを最適化するために効率的な方法で収穫された電源を使用して、我々のアプローチに直交しています。Ekhnnet [46]の大きさより低い電力のためにセンサデータを送信するために従来のデジタルシステムにおいて計算モジュールを最適化するデジタル感知システムです。しかし、システム全体の消費電力

クロック、ADCおよびセンサを含みます私たちのバッテリーフリーの携帯電話よりも二桁高い電力です。 バッテリーフリーの携帯電話のデザインは、私たちガリダー[39]から最大10フィートで動作するRF電力を供給マイクを実証したアナログ後方散乱の我々の以前の仕事に基づいています。本論文では、50フィートの動作範囲を拡張するために、当社の以前のアナログ後方散乱マイクの設計を大幅に改善します。さらに、当社は、最適化を提示し、基地局から50フィートまでの携帯電話ネットワークとの双方向通信を可能にすることができ、バッテリーフリー電話を設計するために、オーディオ受信機とフォトダイオードベースの収穫を統合します。

7考察と結論

本論文では、電力のわずかに数マイクロワットを消費最初の電池不要の携帯電話のデザインを提示します。このセクションでは、我々は、私たちのデザインのパフォーマンスを向上させるために、将来の研究のために様々な手段を概説します。

動作範囲。 バッテリーフリー電話の現在の実装では、フォトダイオードの電力で50フィートまで動作します。私たちの電話の動作範囲は、倍数の技術を使用することによって改善することができるアナログ後方散乱マイクロフォンの性能によって決定される：まず、我々の基地局は、現在、915 MHzのISM帯域で30 dBmの出力電力を送信します。免許不要帯域でFCCにより許可される最大電力。しかし、ライセンスセルラ帯域で、基地局は大幅アナログ後方散乱マイクロホンの動作範囲を増加させるであろう大きさより高い電力の注文を送信することができます。第二に、私たちの現在のプロトタイプは、アナログ後方散乱のための (電圧出力用に設計された) 既存のエレクトレットマイクを転用します。これは、可能な最大差分レーダー断面の一方のみ割を作成します これは弱いアナログ後方散乱された音声信号をもたらします。私たちは、マイクはまた、アナログ後方散乱マイクの性能や動作範囲を増加させる差動レーダー断面を最大化するために設計されたと信じています。第三に、私たちのUSRPベースの基地局は、後方散乱性能を制限する自己干渉に苦しんでいます。一つは、全二重無線の最近の進展やアナログ後方散乱音声の品質を向上させるために、物理的に独立した送信機と受信機を活用することができます。

複数のデバイスをネットワーク。 伝統的なネットワークは、多数のデバイスを横切って無線スペクトルを共有する時分割多重 (TDM)、周波数分割多重 (FDM) の組み合わせを使用します。私たちのバッテリーフリーシステムは、同様の線に沿って拡大縮小することができます。基地局は、各デバイスにタイムスロット及び周波数チャネルを割り当てることにより、異なるデバイスとの通信コーディネイトすることができます。複数の後方散乱デバイスは、その後、データを同時に後方散乱及び異なるタイムスロットで音声を受信するために異なるオフセット (割り当てられた) 周波数を用いてデータとアナログ音声を送信することができます。しかし、これを探ることは、この論文の範囲ではありません。

セキュリティ。 基地局とバッテリーの無料電話は、デジタル状態情報とセキュリティキーを交換するために、既存のセキュリティと暗号化技術を使用することができます。バッテリーフリー電話と基地局間の音声通信を確保するためには、低消費電力のアナログ技術を活用することができます。我々のシステムにおけるアナログ音声は、解像度の8ビットに対応する50デシベルの最大SNRを有します。携帯電話は、追加の使用 (後方散乱変調を使用することができます

インタラクティブ、モバイル、ウェアラブルとユビキタス技術、巻上ACMの議事。1、第2、第25条発行年月：2017年6月。

後方散乱音声に8ビット分解能擬似ランダムアナログ信号を追加するマイクロフォンと並列にFET)。基地局は元の音声を取得するために受信信号からこの擬似ランダム信号を減算することができます。同様に、ダウンリンクチャネル上で、読者はまた、音声に8ビットの乱数を追加することができます。携帯電話は、8ビットの乱数を減算して送信音声を取得するためにRFスイッチを切り替えることができます。8ビットの擬似ランダム信号は、電話に予め符号化されるか（例えば、SIM ID）又は暗号化されたデジタル後方散乱通信を使用してネゴシエートすることができます。

追加機能&機能。 私たちの現在のバッテリーフリー電話のデザインは、（静電容量式タッチを経由して音声とデータ伝送とユーザー入力）携帯電話の基本的な機能を実装しています。我々は1つが簡単に私たちのバッテリーフリー設計に追加機能を統合することができますと信じています。収穫RF及び太陽光発電で動作する電子インクディスプレイは、バッテリーフリー携帯電話に表示を追加するために使用することができることが実証されている[17]。また、AllSee [23]上の私たちの前の仕事では、我々は、ユーザがRFおよび周囲の光から収穫することができ、電力のわずかな数マイクロワットを消費しながら、簡単な手のジェスチャーを使用して対話することができることを示しています。私たちは、電池不要の携帯電話のデザインと、このような低消費電力のジェスチャー認識を統合することができます。

8つの謝辞

私たちは、紙の上で有益なフィードバックのためのレビューに感謝します。また、ソフトウェア開発とシステムの実装では彼らの助けのために美鈴呉とサムカラスに感謝したいと思います。この作品は、国立科学財団（CNS-1452494、CNS-1407583、CNS-1305072）とGoogle学部研究賞の受賞によって部分的に資金を供給されました。すべての4本の著者は、Jeevaワイヤレス社の共同設立者であり、会社の株式の株式を保持します。

REFERENCES

- アナログ・デバイスズによる[1] ADMP801。http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/obsolete-data-sheets/ADMP801.pdf。テキサス・インスツルメンツによって[2] bq25570。http://www.ti.com/lit/ds/symlink/bq25570.pdf。
- （グレートシールバグとして知られている）[3]空洞共振器マイクロフォン。http://www.spybusters.com/GreatシールBug.html。ノールズによって[4] EK23024-00エレクトレットマイクロホン。http://www.knowles.com/download/file?p=EK-23024-000.pdf。[5]モシのMythro。HTTPS://www.moshi.com/audio-earbuds-mythro-mic%。
- テキサス・インスツルメンツによるもの[6] MSP430FR5969マイクロコントローラ。http://www.ti.com/lit/ds/symlink/msp430fr5969.pdf。[7] RF5110/パワーアンプRFDmによる。https://www.digchip.com/datasheets/download_datasheet.php?ID=1106230&部品番号=RF5110 [8]サムシングルE110Z。http://www.phonearena.com/news/Did-you-know-that-Samsung-launched-the-first-solar-powered-cell-phone-id67493。
- スカイワークス社によって[9] SMS7630-061。http://www.skyworksinc.com/uploads/documents/SMS7630_061_201295G.pdf。Ettus研究によって[10] UBX-40 RFのドーターボード。https://www.ettus.com/product/details/UBX40。[11] Ettus研究によってUSRP X300。https://www.ettus.com/product/details/X300-KIT。[12]ビシエ社によってVEMD5060X01。http://www.vishay.com/docs/84278/vemd5060x01.pdf。
- [13]王Anran、ヴィクラムアイヤル、Vamsi TALLA、ジョシュア・スミス、及びShyamnath Gollakota。2017年FM後方散乱：有効に接続された都市とスマートファブリック。に *UsenixのNSDI*。
- [14]マイケル・ブレットナー、ベン・グリーンスタイン、そしてデビッド・ウェザーオール。2011年デュー：計算RFIDのためのエネルギーを意識したランタイム。に *PROC. USENIX NSDI*。197-210。
- [15] JF Ensworth及びMSレイノルズ。ブルートゥース4.0と変調後方散乱互換性：すべてのスマートフォンは、後方散乱リーダーです **低エネルギー（BLE）デバイス。に *RFID*、2015 IEEE国際会議。**
- [16]露芝フー、Lirui劉、最小のLi、及びJunyu王。EPC Gen2のRFIDシステムのための2012年の衝突回復受信機。に *モノのインターネット（IOT）、2012第3回国際会議*。
- [17] Shyamnath Gollakota、マシュー・S・レイノルズ、ジョシュア・R・スミス、及びデビッドJ Wetherall。2014 RFパワー・コンピューティングの出現。 *コンピューター* 47、1（2014）、32-39。
- [18] RCハンセン。散乱体として、ラジエータなどのアンテナ間の1989年の関係。 *PROC. IEEE* 77、5（1989）、659-662。[19]パンのHu、Pengyu張、およびディーバックガネサン。2015自由放任主義：完全に非対称バックスキャッタコミュニケーション。に *議事録 データ通信（SIGCOMM '15）のスペシャル・インタレスト・グループの2015 ACM会議*。
- [20]イーフとPhilipos C Loizou。音声強調のための客観的な品質対策の2008年の評価。 *オーディオに関するIEEEトランザクション、スピーチ、および言語処理* 16、1（2008）、229-238。

インタラクティブ、モバイル、ウェアラブルとユビキタス技術、巻上ACMの議事。1、第2、第25条発行年月：2017年6月。

25:20・V. TALLAら。

- [21]ヴィクラムアイヤル、Vamsi TALLA、ブライスケログ、Shyamnath Gollakota、およびジョシュア・スミス。2016年の技術間の後方散乱：インターネットに向けて
**移種デバイスの接続。に *ACMのSIGCOMM 2016会議で2016年の会議の議事録*。ACM、356から369まで。[22]ブライスケログ、アーロン・バークス、Shyamnath Gollakota、ジョシュアR.スミス、そしてデビッド・ウェザーオール。2014年のWi-Fiの後方散乱：インターネット接続
RF駆動機器のために *SIGCOMMの2014 ACM会議の議事録*。**
- [23]ブライスケログ、Vamsi TALLA、及びShyamnath Gollakota。2014年のすべてのデバイスにジェスチャー認識をもたらします。に *UsenixのNSDI*。
- [24]ブライスケログ、Vamsi TALLA、Shyamnath Gollakota、とジョシュア・スミス。2016年パッシブのWi-Fi：のWi-Fi送信に低消費電力をもたらします。
に *UsenixのNSDI*。
- [25]イオアニスKrikidis、ステリオスTimotheou、Symeon Nikolaou、ガン鄭、デリック・ウィングクワン、およびロバート・ショーバー。2014年同時
無線情報と近代的な通信システムにおけるパワー伝達。 *IEEEコミュニケーションズマガジン* 52、11 (2014)、104-110。
- [26]ビンセント・劉、アーロン・バークス、Vamsi TALLA、Shyamnath Gollakota、デビッド・ウェザーオール、およびジョシュアR・スミス。2013周間の後方散乱：ワイヤレス
薄い空気のうち通信。 *ACM SIGCOMMコンピュータコミュニケーションレビュー* 43、4 (2013)、39-50。
- [27]サマンNaderiparizi、アーロン・バークス、Zerina Kapetanovic、Benjamin Ransford、とジョシュアR・スミス。WISPCam：バッテリーフリーRFID
カメラ。に *IEEE RFID 2015*。
- [28]のPavel VニキーチンとKV Seshagiriラオ。UHF帯RFIDシステムにおけるアンテナ2008と伝播。に *RFID、2008 IEEE国際会議*
に。IEEE、277-288。
- [29]ジョセフAパラティソとタード・スターナー。モバイルおよびワイヤレスエレクトロニクスの清掃2005年のエネルギー。 *IEEEパーベイス・コンピューティング* 4、1 (2005)、18-27。
- [30] AN公園とJRスミス。効率的でスケーラブルなマルチバンドRFの収穫：2014電波をふるいです。に *IEEE RFID 2014*。
- [31]アーロンN.公園、アングリ劉、Shyamnath Gollakota、とジョシュアR.スミス。2014過給周囲後方散乱コミュニケーション。に
SIGCOMMの2014 ACM会議の議事録。
- [32]アーロンN公園、アランソnPサンプル、李趙、およびジョシュアRスミス。周囲RFエネルギーを利用した無線センシングプラットフォーム。に *IEEE BioWireless 2013*。
- [33]ビジェイRaghunathan、アマンKansal、ジェイソン・ス、ジョナサン・フリードマン、およびマニSrivastava氏。太陽エネルギーのための2005年の設計上の考慮事項
ワイヤレス組み込みシステムを収穫。に *センサネットワークにおける情報の処理に関する第4回国際シンポジウムの議事録*。
IEEEプレス、64。
- [34]アランソンサンプルおよびジョシュアRスミス。2つの無線電力伝達システムと2009年の実験結果。に *ラジオとワイヤレス*
シンポジウム、2009年RWS'09。IEEE。IEEE、16-18。
- [35] APサンプル、DJイーガー、PS Powledge、AV Mamishev、およびJRスミス。RFIDベースのバッテリーフリープログラマブルの2008年デザイン
センシングプラットフォーム。 *計測および測定に関するIEEEトランザクション* 57、11 (2008年11月)、2608年から2615年。
- [36] Hucheng日、ヨン・XIN郭、ミャオ族彼、そして鄭忠。環境のための広帯域八木アンテナアレイを使用して2013デュアルバンドレクテナ
RF電力収穫。 *IEEEアンテナと無線伝播手紙* 12 (2013)、918から921。
- [37] Vamsi TALLA、ブライスケログ、ベンジャミンRansford、サマンNaderiparizi、Shyamnath Gollakota、およびジョシュアRスミス。2015年の電源投入
Wi-Fi付きの次の10億台のデバイス。に *Conext*。ACM、4。
- [38] Vamsi TALLA、ステファノPellerano、Hongtao徐、Ashokeラヴィ、及びYorgos Palaskas。バッテリーフリーウェアラブル用のWi-Fi RFエネルギーハーベスティング
ラジオプラットフォーム。に *IEEE RFID 2015*。
- [39] Vamsi TALLAとジョシュアR・スミス。2013ハイブリッドアナログ-デジタル後方散乱：バッテリーフリーセンシングのための新しいアプローチ。に *RFID (RFID)*
*2013 IEEE国際会議*に。IEEE、74-81。
- [40]デズモンドPCサッカレー。1983チューブは結晶ビート：早期ラジオ検出器を。 *IEEEスペクトル* 20、3 (1983)、64-69。[41] HJ Visserの、ACF Reniers、およびJAC Theeuwes
。周囲のRFエネルギー清掃：GSMおよびWLAN/パワー密度測定。に
EuMC 2008。
- [42] Rushi J Vyasさん、ベンジャミン・B・クック、義弘川原、及びマノスM Tentzeris。2013 E-WEHP：バッテリーレス組み込みセンサープラットフォーム
ワイヤレスで周囲のデジタルテレビ信号から電力を供給。 *マイクロ波理論及び技術に関するIEEEトランザクション* 61、6 (2013)、2491年から2505年。
- [43]ジュン殷、ジュン李、男性ケイ法律、Yunxiao陸、男チウ・リー、クオックPingの呉、ボーガオ、ハワード・Cルオン、アミンBermak、マンサンチャン、
その他。2010埋め込み温度センサを有するシステムオンチップEPCのGen-2受動UHF RFIDタグ。 *固体回路のIEEEジャーナル* 45、11 (2010)、2404年から2420年。
- [44] Pengyu張及びディーバックガネサン。2014年には重度のエナジー・ハーベスティング環境でのビット単位の後方散乱通信の有効化。
に **ネットワークシステムの設計と実装 (NSDI'14) の第11回USENIX会議の議事録**。
- [45] Pengyu張、ジェレミーGummeson、およびディーバックガネサン。2012点滅：後方散乱通信のための高スループット・リンク層。に
モバイルシステム、アプリケーション、およびサービスに関する第10回国際会議の議事録。ACM、99から112まで。[46] Pengyu張、パンのHu、ビジェイPasikanti、およびディー
バックガネサン。2014 Ekhonet：次回のための高速、超低消費電力の後方散乱
世代のセンサー。に *モバイルコンピューティングとネットワークの第20回年次国際会議の議事録*。ACM、557-568。[47] Pengyu張、モハammad・ロスタミ、パンのHu、お
およびディーバックガネサン。2016年には、オンボディのための実用的なバックスキャッタ通信の有効化
センサー。に *SIGCOMMのACM SIGCOMM 2016の会議の議事録*。

2017年2月受けました。2017年4月改定。2017年6月に受け入れ

インタラクティブ、モバイル、ウェアラブルとユビキタス技術、巻上ACMの議事。1、第2、第25条発行年月：2017年6月。