

超宽带通信压缩感知信道估计与信号检测方法

张先玉, 刘郁林, 王开
(重庆通信学院 DSP 实验室, 400035, 重庆)

摘要: 针对超宽带信号在采样速率过高时难以采样的问题, 利用信号稀疏性提出一种基于压缩感知的信道估计和信号检测算法(CS 算法). 将信号重复送入随机滤波器后发送, 对接收信号进行欠采样, 利用调制信号、滤波器、信道的圆周卷积关系建立压缩感知的数学模型, 从而可采用基追踪算法实现信道估计和信号检测. 仿真结果表明, CS 算法所需的采样数据量仅为最小二乘算法的 1/3 或更少, 而在中等信噪比(15~25 dB)的情况下, 估计性能可以提高约 4.5 dB, 且可以准确检测出原始信号.

关键词: 超宽带; 信道估计; 压缩感知; 随机滤波器

中图分类号: TN911.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2010)02-0088-04

Ultra Wide-Band Channel Estimation and Signal Detection Through Compressed Sensing

ZHANG Xianyu, LIU Yulin, WANG Kai
(DSP Laboratory, Chongqing Communication Institute, Chongqing 400035, China)

Abstract: A novel algorithm (CS algorithm) for channel estimation and signal detection is proposed to resolve the problem of excessively high sampling rate of the ultra-wideband signals. The algorithm is based on the compressed sensing (CS) theory. The modulated signal is transmitted after random-filtering, and the received signal is sub-sampled. The mathematical model of CS is developed by cyclic convolution of the modulated signals, the random filter and the channel, so the basic pursuit algorithm can be utilized to perform the task of channel estimation and signal detection. Simulation results show that the number of the sampling data required by the proposed algorithm is only one-third or less of the number of the sampling data needed by the least squares algorithm, while the estimation performance is improved by 4.5 dB under the moderate signal-to-noise ratio (15~25 dB) condition, and that the original transmitted signals are correctly detected.

Keywords: ultra wide-band; channel estimation; compressed sensing; random filter

超宽带(UWB)通信是无线通信领域的一个突破, 相比其他无线通信系统, 它具有高空间频谱效率、高测距精度、低截获概率、高抗多径衰落能力、低功耗、低成本、小体积等诸多优点和潜力^[1-2]. 因此, UWB 得到了学术界和工业界的广泛关注.

脉冲无线电超宽带通过发送一串经过调制的极窄脉冲(ns 级)来实现数据传输. 数字化 UWB 接收

机具有极大的灵活性和工艺可实现性^[3]. 在设计 UWB 数字接收机时, 首先要对 UWB 信号进行采样, 然而高带宽对模数转换器(ADC)提出很高要求, 通常要求采样速率高达 10 GHz 以上, 这样高的采样速率在目前的工艺水平下难以实现.

压缩感知是一种新的稀疏信号获取和重构技术^[4], 而 UWB 信道具有很强的稀疏性. Paredes 等

人研究了一种基于压缩感知的 UWB 信道估计算法^[5],但算法利用的随机矩阵存在硬件实现困难、计算复杂度高等缺陷,另外算法要求脉冲间隔大于信道延迟,降低了数据速率.为计算简单和便于硬件实现,本文通过加入随机滤波器来构造随机矩阵,将信号通过随机滤波器后送入信道得到接收信号,再对接收信号进行欠采样可得到测量信号,然后利用发送信号、滤波器和信道的圆周卷积关系建立压缩感知的数学模型,最后利用基追踪(BP)算法重构出信道.

1 压缩感知理论

压缩感知是一种在已知信号稀疏或可压缩的情况下获取或重构信号的技术,它针对观察信号的一组线性测量值,通过重构算法恢复出稀疏信号,其测量向量模型为

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \quad (1)$$

式中: $\mathbf{x} \in \mathbf{R}^N$ 为 N 维稀疏向量,其 l_0 范数 $\|\mathbf{x}\|_0$ 表示向量 \mathbf{x} 中非 0 元素的个数,若 $\|\mathbf{x}\|_0 \leq k$,称 \mathbf{x} 为 k -稀疏向量; \mathbf{A} 为 $n \times N$ 维的线性测量矩阵($n < N$).压缩感知就是从测量向量 $\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} \in \mathbf{R}^n$ 中恢复稀疏向量 \mathbf{x} ^[6].

可通过 l_0 范数最小化得到上述问题的稀疏解

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \|\mathbf{x}\|_0; \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (2)$$

但上述问题为非线性规划问题,求解十分困难,常转化为以下凸优化问题^[7]

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \min \|\mathbf{x}\|_1; \mathbf{A}\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (3)$$

然而,正确恢复稀疏向量 \mathbf{x} 需要 \mathbf{A} 具有受限等距特性(RIP),即:

存在一个常数 $0 < \delta < 1$,使 \mathbf{A} 对所有的 k -稀疏向量 \mathbf{x} 均满足

$$(1 - \delta) \|\mathbf{x}\|_2^2 \leq \|\mathbf{A}\mathbf{x}\|_2^2 \leq (1 + \delta) \|\mathbf{x}\|_2^2 \quad (4)$$

对于测量值含有噪声分量^[8],即

$$\mathbf{y} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{z}$$

式中: \mathbf{z} 为加性高斯白噪声序列,方差为 δ .若 \mathbf{A} 满足 RIP 特性, $\delta < 2^{1/2} - 1$,选择 $\lambda_n = [2(1+a)(1+\delta \lg N)]^{1/2}$,其中 $a \geq 0$,则 \mathbf{x} 的估计值为

$$\hat{\mathbf{x}} = \min \|\mathbf{x}\|_1; \|\mathbf{A}^T(\mathbf{y} - \mathbf{A}\mathbf{x})\|_\infty \leq \lambda_n \quad (5)$$

研究发现^[9],若 \mathbf{A} 中元素服从高斯分布、伯努利分布,或矩阵的行是标准 DFT 变换矩阵的任意 M 行,且 $k \leq C_1 n \lg \left(\frac{N}{k} \right) + C_2 \lg(\epsilon^{-1})$ 时,矩阵以 $1 - \epsilon$ 的概率满足 RIP.假设存在随机向量 $\mathbf{b} = (b_0, b_1, \dots,$

$b_{N-1}) \in \mathbf{R}_N$,由其构成的循环矩阵 $\mathbf{S} \in \mathbf{R}_{N \times N}$,其中矩阵元素 $S_{ij} = b_{j-i \bmod N}$, $i, j = 1, 2, \dots, N$.选择随机子集 $\Omega \subset \{1, \dots, N\}$,元素个数 $n < N$,令 \mathbf{S} 中由 Ω 元素对应下标行向量组成的部分循环矩阵为 $\mathbf{S}_\Omega \in \mathbf{R}_{n \times N}$.若向量 \mathbf{b} 为随机分布的伯努利数据,则矩阵 \mathbf{S}_Ω 满足 RIP 特性^[10].

假设 $N = nK$, $K \in N$,且 $\Omega = \{K, 2K, \dots, nK\}$,则向量 \mathbf{b} 和向量 \mathbf{x} 进行圆周卷积之后,可通过欠采样(采样因子为 K)得到测量值 \mathbf{y} .

2 基于随机滤波器的超宽带信道估计方法

考虑一个单用户超宽带通信系统,令其发送信号为

$$s(t) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} p(t - iT_s - b_i\Delta) = \sum_{i=-\infty}^{+\infty} \sum_{j=0}^{N_f-1} w(t - iT_s - b_i\Delta - jT_f - c_jT_c) \quad (6)$$

式中: $w(t)$ 为发送脉冲; T_s 、 T_f 、 T_c 分别表示符号周期、帧周期和码片周期; N_f 为符号帧数($T_s = N_f T_f$); c_j 为跳时码; b_i 为二进制信息符号; Δ 为调制时间偏移.

以采样速率 $f_s = \frac{1}{\Delta}$ 对 $s(t)$ 进行采样,可得离散发送信号为

$$s(n) = s(n\Delta), n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (7)$$

由于超宽带系统利用 ns 级的窄脉冲传输数据,因此信号占有的带宽很宽,相应地采样速率将会很大.比如宽度为 0.7 ns 的脉冲,采样速率需要 17.9 ~ 35.7 GHz,而这样高的采样速率在目前的技术水平下难以实现.UWB 信道的多径分量非常丰富,对于室内传播环境,信道的多径高达 1 160 条,但经过统计发现,大约 70 条就占有信道 85% 的能量^[5],可见 UWB 信道具有很强的稀疏性.另外,由于 UWB 采用极窄脉冲调制信号,脉冲的占空比很小,因此信号 s 同样具有很强的稀疏性.

前面所述的压缩感知理论适用于高维稀疏信号的采集和处理,因此可以考虑将压缩感知应用于 UWB 系统中.应用压缩感知需要建立一个测量矩阵,这可以通过随机滤波器构造随机循环矩阵来实现.常用的随机滤波器系数由随机高斯序列、伯努利数据序列等产生.其中伯努利序列由于产生简单且计算方便,因此本文选用随机伯努利序列.

图 1 为系统结构图,调制信号通过随机滤波器

后进入信道,之后进行低速 A/D 采样,最后对测量信号进行处理得到估计信道。

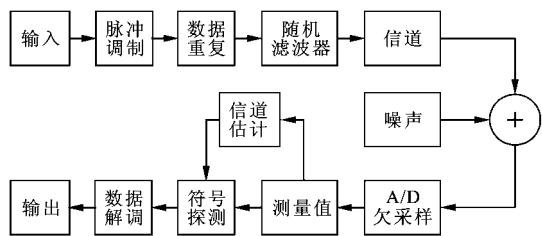


图1 系统结构图

为构建压缩感知信道估计模型,首先作以下假设和处理:

- (1) 设发送信号的长度 N 大于信道 h 的长度;
- (2) 随机滤波器 b 的长度为 N ;
- (3) 将调制信号重复 3 次送入滤波器 b 。

假设发送信号 $x = [s(0), \dots, s(N-1), s(0), \dots, s(N-1), s(0), \dots, s(N-1)]^T$, 则经过随机滤波器 b 和信道 h 后,由于信号重复 3 次发送且信道和滤波器的长度均不超过 N , 所以接收信号的第 3 个数据块(即第 $2N+1 \sim 3N$ 点)可视为 s, b, h 的圆周卷积,对其进行均匀欠采样,采样点数为 M , 得到测量向量

$$y = D \downarrow (s \otimes b \otimes h + z) \quad (8)$$

式中: $D \downarrow$ 表示欠采样, 采样因子为 $\lfloor \frac{N}{M} \rfloor$; \otimes 表示圆周卷积; z 为加性高斯白噪声序列。

式(8)中 h 和 s 都具有很强的稀疏性, 在已知 s 或 h 的情况下可考虑采用压缩感知技术获取另一向量, 由此产生一种新的 UWB 信道估计和符号解调方法。

描述算法之前, 定义如下矩阵

$$\Psi = \begin{bmatrix} s(0) & s(N-1) & \cdots & s(1) \\ s(1) & s(0) & \cdots & s(2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ s(N-1) & s(N-2) & \cdots & s(0) \end{bmatrix};$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} b(0) & b(1) & \cdots & b(N-1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ b(N-1) & b(N-2) & \cdots & b(0) \end{bmatrix}$$

假设 $N = MK$, $\Omega = \{K, 2K, \dots, MK\}$, 令 Φ_Ω 表示 Φ 中含有 Ω 中元素对应的行向量, 则测量值为

$$y = \Phi_\Omega \Psi h \quad (9)$$

这实际上是对信号进行欠采样, 采样因子为 K 。式(9)中 y 和 h 分别为 $M \times 1$ 和 $N \times 1$ 的列向量。 Φ_Ω

中元素为随机伯努利数据, 根据文献[10], Φ_Ω 满足 RIP 特性, 此时可利用压缩感知理论重构信道 h 。

通过 l_1 范数最小化可重构出信道, 目前常用的重构算法有 BP、MP、OMP 和其他算法^[11], 本文采用 BP 重构算法^[12], 即

$$\hat{h} = \min \|h\|_1; y = \Phi_\Omega \Psi h \quad (10)$$

3 超宽带信号检测

得到估计信道后, 可建立另一模型用于信号检测。令复合信道为 $g(t) = \hat{h}(t) * w(t)$, 其中 $*$ 为卷积, 采样得 $g = [g(0), g(1), \dots, g(N-1)]$ 。当然, 若已知信道状态信息, 则复合信道可利用 $h(t)$ 直接获得, 此时令

$$\Theta = \begin{bmatrix} \hat{g}(0) & \hat{g}(1) & \cdots & \hat{g}(N-1) \\ \hat{g}(1) & \hat{g}(2) & \cdots & \hat{g}(N-2) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \hat{g}(N-1) & \hat{g}(N-2) & \cdots & \hat{g}(0) \end{bmatrix}$$

则测量信号可同时表示为

$$y = \Phi_\Omega \Theta x \quad (11)$$

由于 x 为 $N \times 1$ 维列向量, 令脉冲位置处为 1, 其余为 0, 则 TH-PPM 系统单个符号中非 0 数目为 N_f , 远小于整个信号长度 N , 因此 x 具有很强的稀疏性。此时, 可通过压缩感知技术进行信号的恢复和解调

$$\hat{x} = \min \|x\|_1; y = \Phi_\Omega \Theta x \quad (12)$$

此时通过 x 中 1 的位置(即脉冲位置)可解调出二进制数据。

4 仿真实验

仿真实验的参数设置如下: UWB 发送脉冲 $w(t)$ 为高斯信号, 脉冲宽度为 0.65 ns, 且能量归一化; 调制参数 $T_f = 20$ ns, $N_f = 6$, $\Delta = 2$ ns, 调制信息为随机二进制序列; 模拟信号的时间分辨率为 50 ps。仿真实验采用 IEEE802.15.4a 工作组提交的信道模型^[13]。滤波器系数为随机产生的伯努利分布序列。

图 2 为 UWB 原始信道和利用压缩感知算法估计信道的对比, 其中测量值数目 $M = 5K$, 信噪比为 20 dB。可见, 估计信道相比原始信道只有微小的幅度差异。另外, 信道中非 0 抽头数目一般不超过 70~120, 而在 20 dB 的采样速率下信道中的抽头数目为 2 400, 即只需 $1/7 \sim 1/3$ 的原始采样点数就可完成信道估计, 大大降低了采样速率。为评价信道估计

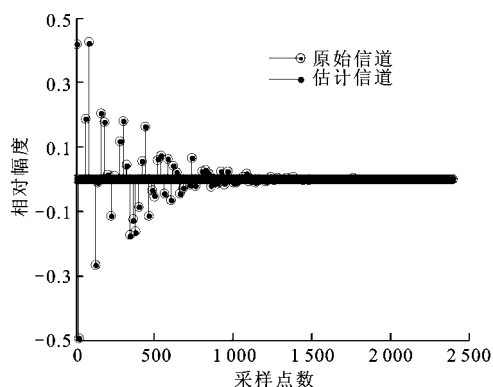


图2 原始信道和估计信道对比图

性能,将本文提出的基于随机滤波器的压缩感知信道估计方法和传统的LS估计方法(假定LS算法已知信道长度)进行比较,并利用归一化均方误差来评价算法性能,结果如图3所示.从图3可以看出,本文算法的性能明显优于LS算法,在中等信噪比(15~25 dB)下,本文算法的均方误差性能提高约4.5 dB.分析其原因,本文算法性能的提高得益于算法充分利用了信道的稀疏特性,利用 l_1 范数最小化得到了稀疏信道估计值,避免了大量的噪声干扰,而LS算法则假定信道为密集多径,是利用均方误差最小获得信道估计值,噪声的影响较大,使得性能有较大损失.

得到信道估计值后,可采用第3节的算法进行脉冲信号检测.图4为在200 MHz的采样速率下利用估计信道得到的检测信号和原始信号对比图.从图4可以看出,检测信号能够准确匹配原始信号的位置,但由于受到估计信道误差和噪声的影响,信号幅度有轻微变化.若系统采用TH-PPM调制,则通过本文算法能准确得到调制信息,并且算法不需要大量的相关接收器(如RAKE接收机),极大地降低了系统复杂度,节省了大量的模拟器材资源,进而降低了系统成本.因此,本文提出的技术具有广泛的应用前景.

5 结论

针对UWB信号在采样速率过高时难以采样的问题,采用一种新的压缩感知采样技术,将调制信号重复送入随机滤波器后发送,经过信道后对信号进行欠采样得到一组测量值,再利用发送信号、随机滤波器和信道建立压缩感知的数学模型,最后采用BP算法得到信道估计值.再利用估计信道可同时检测出脉冲的幅度和位置用于信号的解调.仿真结果表明,算法利用很少的采样信息就能进行信道估计和

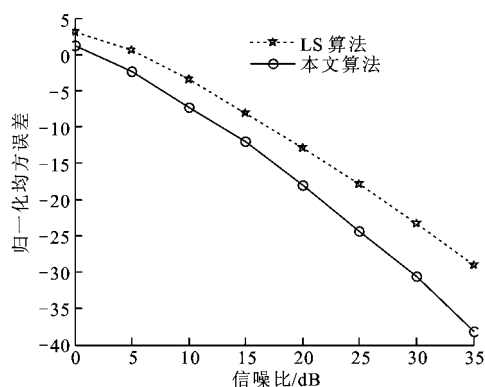


图3 算法估计性能曲线

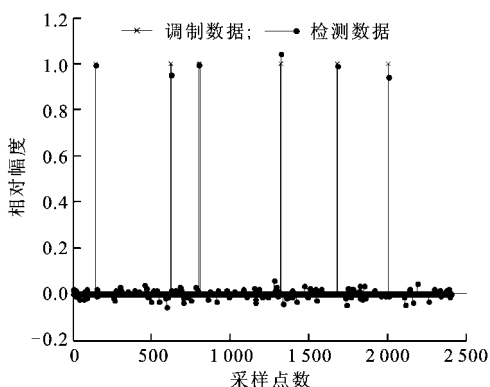


图4 调制信号和检测信号对比图

信号检测.

然而,采用这一技术还有很多挑战,比如如何建立性能更好、结构更简单的随机滤波器,如何寻找更好的重构算法等,这些都是亟待解决的关键问题,也是下一步的研究方向.

参考文献:

- [1] BENEDETTO M D, KAISER T, MOLISH A F, et al. UWB communication systems: a comprehensive overview[M]. New York, USA: Hindawi Publishing Corporation, 2006.
- [2] QIU R C, SCHOLTZ R A, SHEN X. Guest editorial special section on ultra-wideband wireless communications: a new horizon[J]. IEEE Trans on Veh Technol, 2005, 54(5): 1525-1527.
- [3] BLAZQUEZ R, LEE F S, WENTZLOFF D D, et al. Digital architecture for an ultra-wideband radio receiver[C] //Proceedings of IEEE VTC. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2003: 1303-1307.
- [4] BARANIUK R. Compressive sensing[C] //Proceedings of Annual Conference on Information Sciences and Systems. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2008: 1289-1306.

(下转第124页)

- 的替代选择概述[J]. 制冷学报, 2008, 28(3): 18-23.
- LI Gang, XIE Yingming, LIU Daoping. New type gas hydrate cool-storage media[J]. Journal of Refrigeration, 2008, 28(3): 18-23.
- [3] 徐永松, 童明伟. 新型蓄冷工质气体水合物研究现状及其应用[J]. 制冷与空调, 2006, 20(4): 94-100.
- XU Yongsong, TONG Mingwei. Presents the state on the research of new-type cool storage medium gas hydrate and its application[J]. Refrigeration and Air Condition, 2006, 20(4): 94-100.
- [4] 杨亮, 樊栓狮, 郎雪梅. 气体水合物在空调蓄冷中的应用研究进展[J]. 现代化工, 2008, 28(9): 33-37.
- YANG Liang, FAN Shuanshi, LANG Xuemei. Application prospects of gas hydrate as cool storage media in air-conditioning[J]. Modern Chemical Industry, 2008, 28(9): 33-37.
- [5] 刘勇, 郭开华, 梁德青, 等. 在磁场作用下 HCFC-141b 制冷剂气体水合物的生成过程[J]. 中国科学: B 辑, 2003, 33(1): 89-96.
- [6] 刘永红, 郭开华, 梁得青, 等. 超声波对 HCFC-141b 水合物结晶过程的影响[J]. 武汉理工大学学报, 2002, 24(12): 21-23.
- LIU Yonghong, GUO Kaihua, LIANG Deqing, et al. Experimental study on crystallizing process of HCFC-141b hydrate by ultrasonic[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2002, 24(12): 21-23.
- [7] 李金平, 王立璞, 梁德青, 等. 表面活性剂对气体水合物生成过程的影响[J]. 中国科学技术大学学报, 2006, 36(4): 364-369.
- [8] 李金平, 吴疆, 梁德青, 等. 纳米流体中气体水合物生成过程的实验研究[J]. 西安交通大学学报, 2006, 40(3): 365-368.
- LI Jinping, WU Jiang, LIANG Deqing, et al. Experimental study on formation process of gas hydrate in nanofluids[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2006, 40(3): 365-368.
- [9] 李金平, 郭开华, 梁德青, 等. 铁丝对 HCFC-141b 气体水合物生成过程的显著影响[J]. 西安交通大学学报, 2004, 38(7): 767-770.
- LI Jinping, GUO Kaihua, LIANG Deqing, et al. Distinct influence of iron rod on the formation of the HCFC-141b gas hydrate[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(7): 767-770.
- [10] 周锡堂, 樊栓狮, 梁德青, 等. HCFC-141b 乳化液生成气体水合物[J]. 化工学报, 2007, 58(3): 728-732.
- ZHOU Xitang, FAN Shuanshi, LIANG Deqing, et al. HCFC-141b hydrate formation from its emulsion[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering, 2007, 58(3): 728-732.
- [11] ENGLEZOS P, KALOGERAKIS N, DHOLABHAI P D, et al. Kinetics of formation of methane and ethane gas hydrates[J]. Chemical Engineering Science, 1987, 42(11): 2647-2658.
- [12] SLOAN E D, KOH C. Clathrate hydrates of natural gases[M]. 2nd ed. New York, USA: Marcel Dekker, 1998.

(编辑 杜秀杰)

(上接第91页)

- [5] PAREDES J L, ARCE G R, WANG Zhongmin. Ultra-wideband compressed sensing: channel estimation[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Signal Processing, 2007, 1(3): 383-395.
- [6] COHEN A, DAHMEN W, DEVORE R. Compressed sensing and best k -term approximation[J]. Journal of the American Mathematical Society, 2009, 22(1): 211-231.
- [7] DONOHO D L. For most large underdetermined systems of equations, the minimal l_1 -norm near-solution approximates the sparsest near-solution[J]. Communications on Pure and Applied Mathematics, 2006, 59(7): 907-934.
- [8] HAUPT J, NOWAK R. Signal reconstruction from noisy random projections[J]. IEEE Trans on Information Theory, 2006, 52(9): 4036-4048.
- [9] CANDÈS E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 25(2): 21-30.
- [10] BAJWA W U, HAUPT J, RAZ G, et al. Toeplitz-structured compressed sensing matrices[C] // Proceedings of IEEE SSP' 07. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2007: 294-298.
- [11] DUARTE M F, DAVENPORT M A, WAKIN M B, et al. Sparse signal detection from incoherent projections[C] // Proceedings of IEEE ICASSP. Piscataway, NJ, USA: IEEE, 2006: 305-308.
- [12] DONOHO D. SparseLab [EB/OL]. [2009-04-20]. <http://sparselab.stanford.edu/SparseLab.files/Download.files/SparseLab21-Core.zip>.
- [13] MOLISCH A F. IEEE 802.15.4a channel model: final report[EB/OL]. [2009-02-28]. <http://www.ieee802.org/15/pub/TG4a.html>

(编辑 刘杨)