

日本におけるマルチビーム衛星通信システムの 帯域と電力の配分量について

奥浜 駿[†] 渡部 康平^{††} 中平 勝也^{†††}

[†] 沖縄工業高等専門学校電子通信システム工学コース 〒905-2192 沖縄県名護市辺野古 905 番地

^{††} 長岡技術科学大学 〒940-2188 新潟県長岡市富岡町 1603-1

^{†††} 沖縄工業高等専門学校情報通信システム工学科 〒905-2192 沖縄県名護市辺野古 905 番地

E-mail: [†]ac204603@edu.okinawa-ct.ac.jp, ^{††}k_watabe@vos.nagaokaut.co.jp, ^{†††}nakahira@okinawa-ct.co.jp

あらまし 衛星通信は周波数と電力の有効利用の観点からマルチビーム方式が主流となっている。そこで、マルチビームにおけるサービスエリアのユーザーのスループットを算出できるシミュレータを開発した。開発したシミュレータを用いて日本列島においてスループットが増大となるビームごとの周波数帯域と電力の配分量を試算した。
キーワード 衛星通信, マルチビーム, スループット

Bandwidth and Power Allocation for a Multi-beam Satellite Communication System in the Japanese Islands

Shun Okuhama[†] Kohei Watabe^{††} Katsuya Nakahira^{†††}

^{†, †††} National Institute of Technology, Okinawa College 905 Henoko, Nago city, Okinawa, 905-2192

^{††} Nagaoka University of Technology 1603-1 Tomioka, Nagaoka city, Niigata, 940-2188

E-mail: [†]ac204603@edu.okinawa-ct.ac.jp, ^{††}k_watabe@vos.nagaokaut.co.jp, ^{†††}nakahira@okinawa-ct.co.jp

Abstract Multi-beam systems have become the mainstream for satellite communications because they can make effective use of frequency and power. We develop a simulator that can calculate the throughput of users in the service area for multi-beam. Using the developed simulator, we estimated the amount of frequency bands and power allocation for each beam to increase the throughput in the Japanese Islands.

Keywords Satellite Communication, Multi-Beam, Throughput

1. 背景

2011 年 3 月 11 日に発生した東日本大震災では、地震や津波の影響により、通信事業者の携帯電話基地局が多く被災した[1]。そこで、各通信事業者は、応急対策として衛星通信を活用した。その結果、地震発生直後の 15 時から衛星通信の通信回数と通信時間が大幅に増加した[2]。したがって、4G、5G の地上無線通信が利用できない災害時は、衛星通信が有効である。

2. マルチビーム方式

衛星が通信に利用できる総周波数帯域と総電力に限りがある。そこで、総周波数帯域と総電力を有効利用できるマルチビーム方式が主流となっている[3]。

マルチビーム方式の構成図を図 1 に示す。図 1 は日本列島を対象としており、衛星から複数のビームを照射する。マルチビーム方式では、ビームごとに異なる周波数帯域を用いることができるため、従来のシング

ルビームに比べて多くの周波数帯を割り当てることができる。さらに、マルチビーム方式は各ビームのユーザー数に応じて、ビームごとに電力を調整できる。

マルチビーム方式の課題として、同一周波数帯のビームを繰り返し用いることによるビーム間の干渉電力 I の増大とビーム数の増加に伴う受信電力 C の減少によって、 $C/(N+I)$ が減少する[4]。その結果、スループットが減少する可能性がある。なお、 N は受信アンテナの熱雑音である。

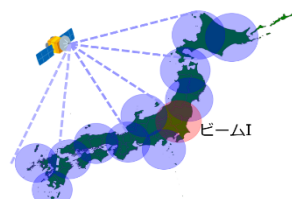


図 1 日本列島を対象としたビーム配置

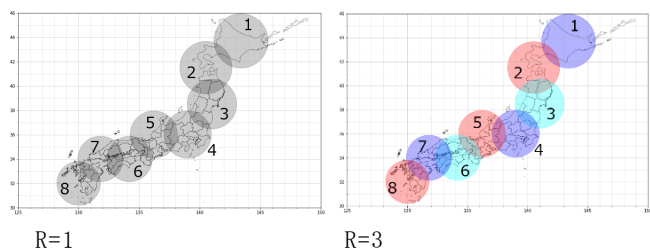


図 2 日本列島を対象とした 8 ビーム配置

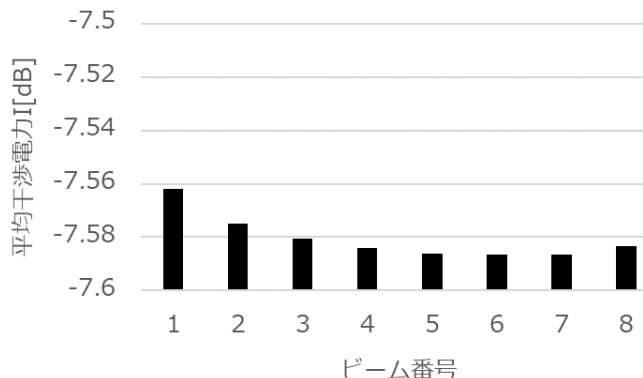


図 3 各ビームの干渉電力 I の平均

3. 目的と手法

本研究では、ユーザーのスループットの増大を目的とする。そこで、サービスエリアのユーザーのスループットを算出できるシミュレータを用いて、スループットが最大となるマルチビームにおける繰り返しビーム数と各ビームに配分する電力を求める。

4. 繰り返しビーム数

繰り返しビーム数 R は総周波数帯域の分割数を表す。例として図 2 に日本列島を 8 ビーム配置で覆い、繰り返しビーム数 $R=1$ と $R=3$ のときのマルチビーム構成を示す。ビームの色は周波数帯域の違いを表している。

$R=1$ は、全ビームがお互いに干渉し合うため、干渉電力 I が増大するという欠点がある。しかし、総周波数帯域を分割しないため、各ビームの周波数帯域幅は最大となる利点がある[5]。

$R=3$ は、同じ周波数帯域（同じ色）を用いるビーム同士の距離が大きくなるため、 $R=1$ に比べると干渉電力 I が減少するという利点がある。しかし、総周波数帯域は 3 つに分割される欠点がある。

5. 各ビームに配分する電力

ビームに配分する電力 C によって、各ビームが受ける干渉電力 I が変化する。

ここで、簡単のため通信衛星から各ビームまでの距離が一定とする。図 3 は同一周波数帯域を用いる 8 ビームに電力を均等に配分したときの各ビームが受ける干渉電力 I の平均である。各ビームの位置関係が対象とならないため、干渉電力 I はビームごとに異なる。

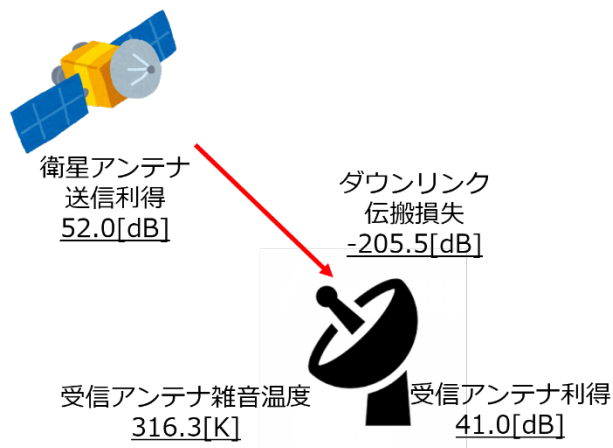


図 4 想定システム

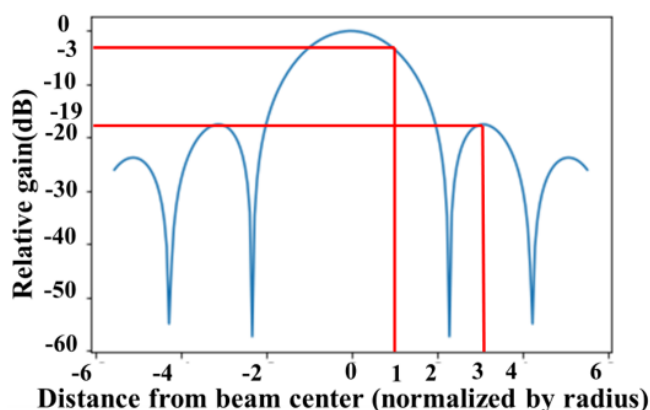


図 5 衛星アンテナの地表面におけるビームパターン

6. シミュレータ

6.1. 想定システム

図 4 に示す通り、衛星アンテナの送信利得を 52.0 [dB]、受信アンテナの利得を 41.0 [dB]、受信アンテナの雑音温度を 316.3 [K]、ダウンリンクにおける伝搬損失を -205.5 [dB] とした[6]。

6.2. ビームパターン

衛星アンテナの地表面におけるビームパターンを図 5 に示す。横軸はビームの中心からの距離を表しており、ビームの半径で規格化した。縦軸はビームの照射位置から減衰する電力を相対利得で表す。なお、ビームエッジの相対利得は -3 [dB] とした。

6.3. ビーム利得の算出

ビーム利得 G_p を式(1)より求める。 R は衛星アンテナの直径、 λ は搬送周波数帯域の波長、 J_1 はベッセル 1 次関数、 θ はビーム角とする。

$$G(\theta) = \left(\frac{2J_1\left(\frac{\pi R}{\lambda} \sin\theta\right)}{\frac{\pi R}{\lambda} \sin\theta} \right)^2 \quad (1)$$

6.4. 受信電力 C と干渉電力 I の算出

受信電力 C と干渉電力 I は式(2)、(3)より求める。 j は周波数帯域の識別子、 i はビームの識別子、 $P(j,i)$ はビーム i へ配分する電力、 B_j は周波数帯域 j を利用するビームの総数とする。 G_p は伝搬利得であり、式(4)より G_t (衛星アンテナの送信利得) と G_r (受信アンテナの利得) と L_d (ダウンリンクにおける伝搬損失) から求める。

$$C(j,i) = P(j,i)G(\theta_{j,i})G_p \quad (2)$$

$$I(j,i) = \sum_{k=1, k \neq i}^{B_j} P(j,k)G(\theta_{j,k})G_p \quad (3)$$

$$G_p = G_t G_r L_d \quad (4)$$

6.5. 熱雑音 N の算出

熱雑音は式(5)より求める。 k はボルツマン定数の 1.38×10^{-23} 、 T は雑音温度の 316.3[K]、 W は衛星が利用できる総周波数帯域の 35[MHz]とする。 R は前述した繰り返しビーム数である。

$$N = kT(W/R) \quad (5)$$

6.6. スループットの計算手順

シミュレータは、以下の手順でサービスエリア内のユーザーのスループットを求める。

1. 繰り返しビーム数と各ビームに配分する電力を設定する。
2. サービスエリアにビームを照射する。
3. ビーム内に存在するユーザーの $C/(N+I)$ を求める。
例として、図 1 の赤色のビーム I の $C/(N+I)$ の分布を図 6 に示す。ビームの中心が最も $C/(N+I)$ が高く、他のビームと干渉するビームエッジは

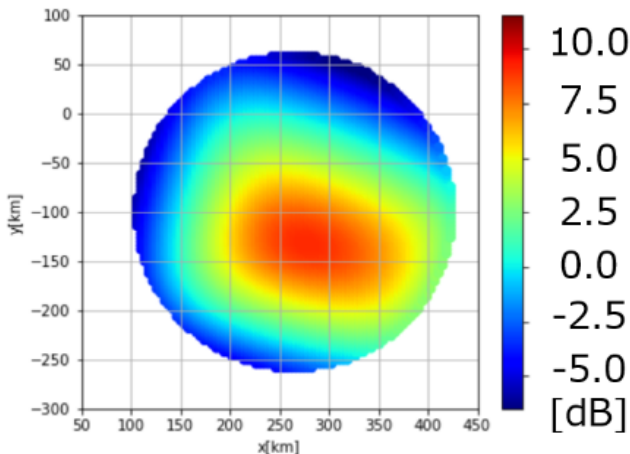


図 6 ビーム I の $C/(N+I)$ の分布

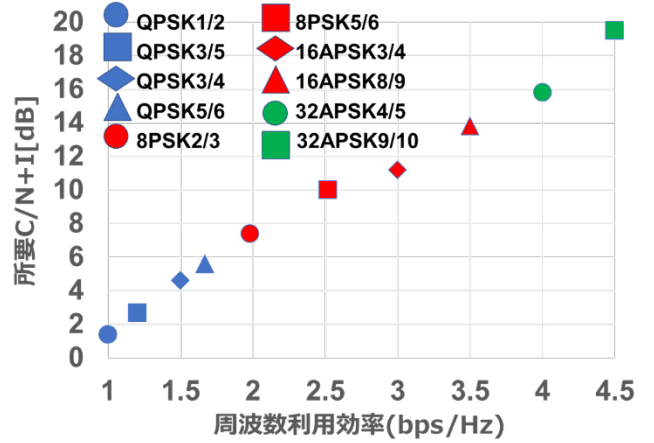


図 7 通信方式と周波数利用効率

$C/(N+I)$ が低い。

次に、ビーム内の全ユーザーの $C/(N+I)$ から平均 $C/(N+I)$ を求める。

4. 各ビームの平均 $C/(N+I)$ から通信方式（変調方式と誤り訂正符号化率の組み合わせ）を選択する。
シミュレータは図 7 に示す 10 種類の通信方式を用いる。平均 $C/(N+I)$ が通信方式の所要 $C/(N+I)$ 以上となり、かつ $C/(N+I)$ に最も近い通信方式を選択する適応変調を採用した。
5. 式(6)を用いてユーザーのスループット B を求める。 U は通信方式によって決められた周波数利用効率である。

$$B = U \times W/R \quad (6)$$

7. シミュレーション

7.1. シミュレーション条件

総電力は 12[W]で、総周波数帯域は 35[MHz]を用いる。全ユーザーは 2000 人とする。図 8 に示すように各ビームには都道府県の人口分布をもとに合計 2000 人のユーザーを分散させた。

図 2 と図 9 に示すように繰り返しビーム数を $R=1$ から $R=8$ まで変化させた。変化させた R ごとに最適化アルゴリズムの Adam を用いて[7]、全ユーザーの平均スループットが最大となるように各ビームに電力を配分した。

7.2. スループットの総和

図 10 に繰り返しビーム数 R ごとの全ユーザーのスループットの総和を示す。図 10 より繰り返しビーム数 $R=5$ でスループットの総和が最大となった。この理由を以下に考察する。

図 11 に繰り返しビーム数ごとの各ビームの平均干渉電力 I を示す。図 12 に繰り返しビーム数ごとの各ビ

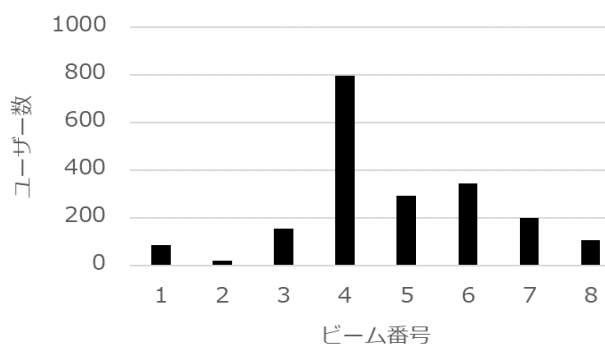


図 8 各ビームのユーザー数

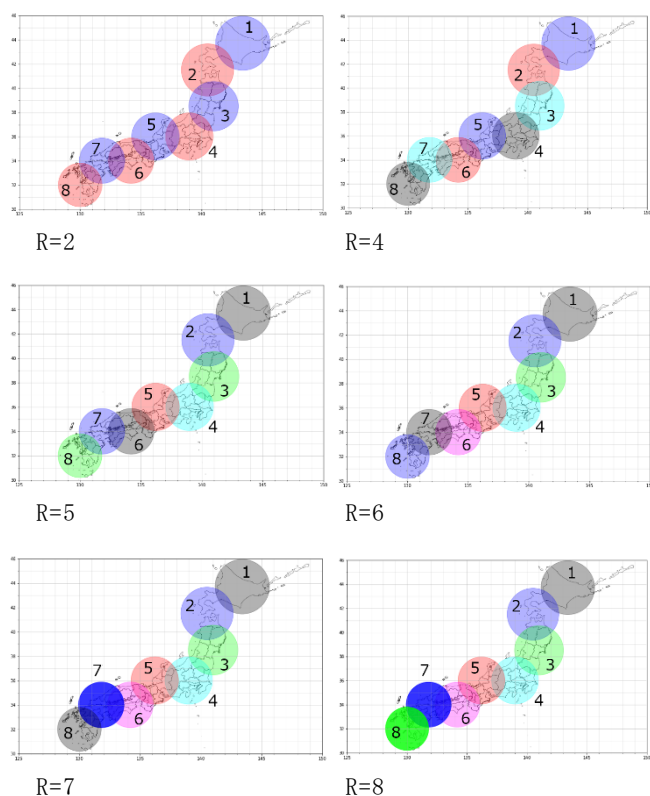


図 9 日本列島を対象とした 8 ビーム配置

ームの周波数帯域 W を示す。これらの結果より、繰り返しビーム数 R の増加にしたがって各ビームの干渉電力 I と周波数帯域幅が減少していく。干渉電力 I の減少はスループットの増加につながるが、周波数帯域 W の減少はスループットの低下につながる。従って、図 10 に示したように、繰り返しビーム数 R の増加にしたがってスループットが最大となるポイントが発生し、繰り返しビーム数 $R=5$ でスループットの総和が最大となった。

7.3. ユーザーごとのスループットの分布

図 13 は、繰り返しビーム数 $R=5$ のときのスループットに対するユーザー数の累積分布を示す。スループット $5[\text{kbps}]$ のユーザーが全体の約 45% と多い。スループットが大きくなるにつれてユーザー数が減少しており、最大スループット $105[\text{kbps}]$ のユーザーが全体の約

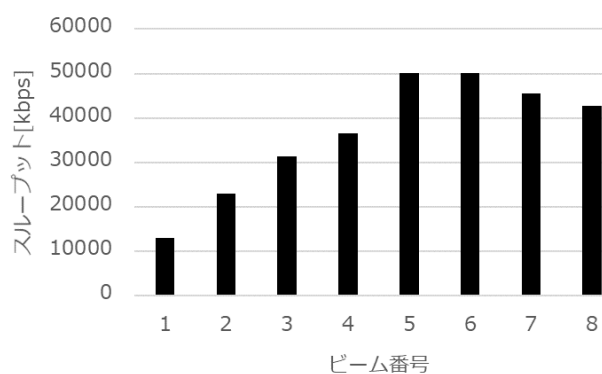


図 10 繰り返しビーム数ごとのスループットの総和

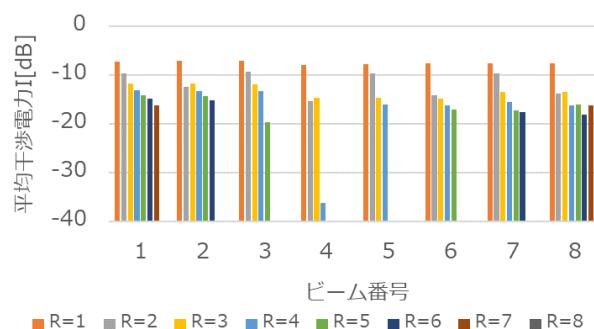


図 11 繰り返しビーム数ごとの各ビームの干渉電力 I の平均

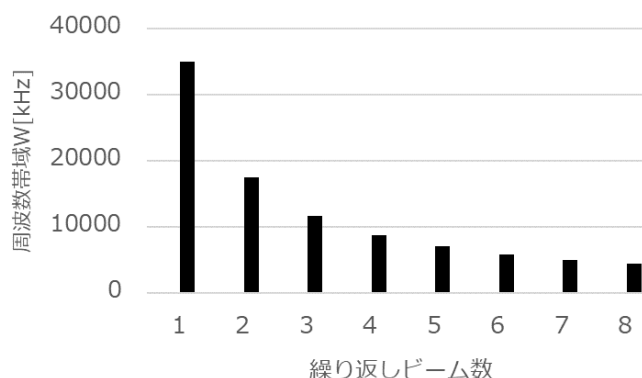


図 12 繰り返しビーム数ごとの周波数帯域 W

6% となった。上述のように、一部のユーザーのスループットが大きくなっていることから、通信サービスに対するユーザー間の公平性がない。

図 14 に繰り返しビーム数 $R=5$ のときの各ビームに最適配分された電力を示す。さらに図 15 に繰り返しビーム数 $R=5$ のときの各ビーム内のユーザーのスループットの平均を示す。これらの図よりビーム 1 とビーム 2 とビーム 8 に配分された電力が非常に小さく、その結果、ビーム 1 とビーム 2 とビーム 8 に存在するユーザーのスループットが非常に小さくなっている。

以上述べたように、マルチビーム衛星通信システムに本稿で提案する繰り返しビーム数を設定し、最適な電力配分を行った場合には、全ユーザーのスループッ

トの総和は増大するが、ユーザー間のスループットの公平性が損なわれ、後者は今後の課題と考えている。

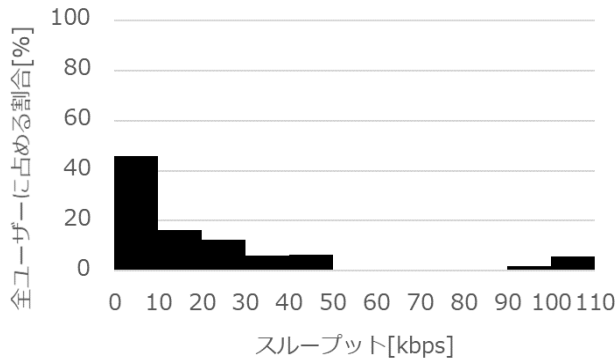


図 13 R=5 のときのスループットに対するユーザー数の累積分布

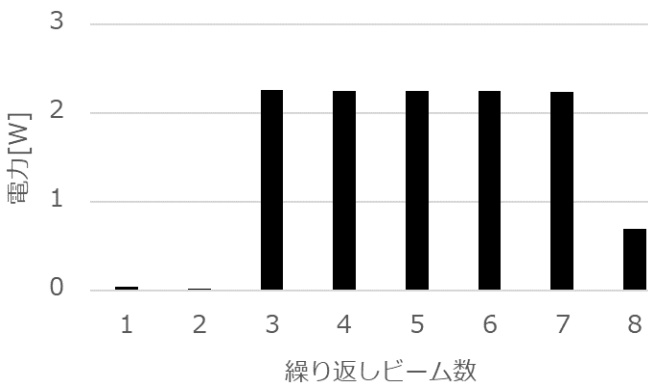


図 14 R=5 のときの各ビームに配分された電力

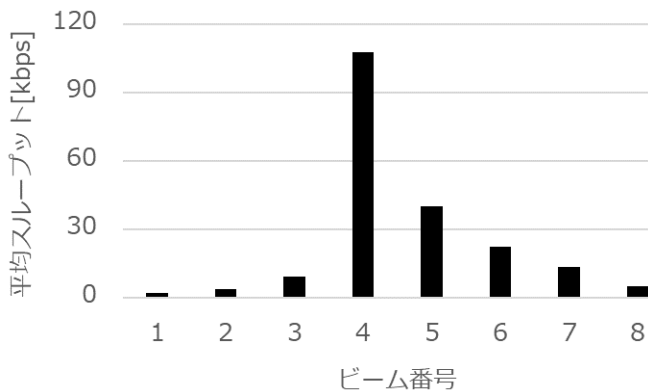


図 15 R=5 のときの各ビームのユーザーのスループットの平均

8. おわりに

各ビームに配分する電力と繰り返しビーム数を設定できるシミュレータを開発した。本シミュレータを用いて、ユーザーのスループットの平均が最大となるように繰り返しビーム数 R と各ビームの電力を配分した。その結果、繰り返しビーム数を 5 としたとき、最もスループットが高くなることを明らかにした。

9. 謝辞

本研究は科研費（21K0452）と（20H04172）の助成を受けたものである。

文 献

- [1] 総務省，“東日本大震災における情報通信の状況”，情報通信白書，2011.
- [2] 財団法人自治体衛星通信機構，“情報通信白書”，7.2012.
- [3] 内閣府宇宙戦略室，“通信・放送衛星の現状、課題及び今後の検討の方向” 9,2012.
- [4] 中平勝也，“マルチビーム衛星通信システムにおけるスペクトラム圧縮リソース制御の提案”，電子情報通信学会，2016
- [5] 杉田太一，“マルチビーム衛星通信システムにおける最適繰り返しビーム数の検討”，電子情報通信学会，2021
- [6] 総務省，“S 帯システム提案とりまとめ表（案），2013.11.14
- [7] Diederik P.Kingma, “Adam: A Method for Stochastic Optimization”, ICLR, 2015