

# 秘匿通信アレーアンテナ

栗山 侑\*  
後藤 準\*  
紀平一成\*\*

## Transmission Array Antenna for Secure Communication

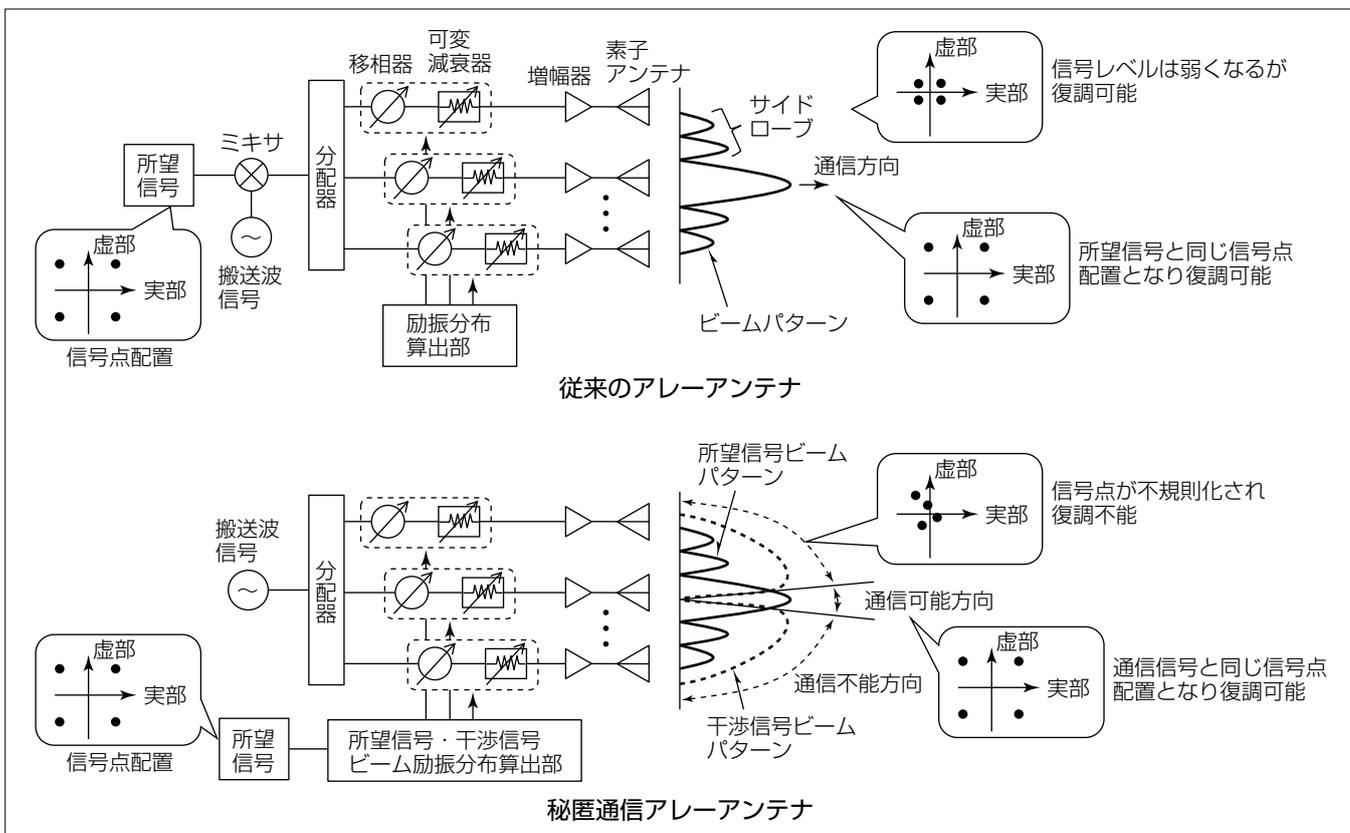
Tasuku Kuriyama, Jun Goto, Kazunari Kihira

### 要 旨

無線通信はオープンな空間で電波を用いて情報を送受信するため、電波傍受によって解読される可能性がある。通信用アンテナとして複数の素子アンテナを配列したアレーアンテナを用いると、アンテナの指向性で送信方向によって信号の強弱を作り出すことができるが、全方位に同一信号が送信されるため、通信方向外でも傍受されて解読できてしまう。この対策の一つとして電波や信号処理を活用してセキュリティを高める技術が近年注目されている。

アレーアンテナに備わる移相器や可変減衰器等を使って

搬送波を変調することで、通信方向外の信号を不規則化して復調を不可能にし、限られた方向で復調を可能にするのが秘匿通信アレーアンテナである。このアンテナでは、所望信号ビームと干渉信号ビームを同時形成してビームを時間変化させる方式を用いて秘匿通信を実現している。この方式を用いた秘匿通信アレーアンテナの通信性能を評価した結果、復調が可能となる角度幅を従来のアレーアンテナと比較して約1/5に狭くできることを確認した。



### 秘匿通信アレーアンテナ

従来のアレーアンテナはアンテナ指向性による信号の強弱はあっても全方位に同一信号が送信されるため、通信方向外のサイドローブ方向でも解読される可能性があった。秘匿通信アレーアンテナはアレーアンテナの移相器や可変減衰器を使って搬送波を変調し、所望信号ビームと干渉信号ビームを同時形成することによって、通信方向外では信号点配置を不規則化して復調を不可能にし、限られた方向だけで通信を可能にする。

## 1. ま え が き

無線通信はオープンな空間で電波を用いて情報を送受信するため、意図しない人に通信電波を傍受されて通信内容を盗聴・解読される危険性がある。通信用アンテナにアレーアンテナを用いると、形成されるビームパターンで送信方向によって信号電力の強弱を形成できる。しかし全方位に同一信号が送信されるため、通信方向外のサイドロブ方向などでも解読される可能性があった。この対策として、数学的な計算量の多さを根拠とする計算量的安全性に基づく共通鍵暗号方式などの暗号技術が広く使用されている。

これとは別の取組みとして情報量的な複雑さを根拠とする情報理論的安全性に基づく物理層セキュリティ技術が提案されている<sup>(1)</sup>。物理層セキュリティ技術は電波や信号処理を活用してセキュリティを高める技術で、例えば、電波伝搬路特性を活用して正規者間でだけ秘密鍵を共有する方法、所望信号に正規者間で既知の人工雑音を付与して所望信号を気づかれないようにする方法などがある<sup>(2)</sup>。

本稿では物理層セキュリティ技術の一つである、指向性変調技術を用いるアレーアンテナ(以下“秘匿通信アレーアンテナ”という。)について述べる。また、秘匿通信アレーアンテナを実現するアレーアンテナの励振分布算出法の原理と通信性能評価結果についても述べる。

## 2. 秘匿通信アレーアンテナ

### 2.1 指向性変調技術

指向性変調はアレーアンテナに備わる移相器や可変減衰器を用いて搬送波信号に変調を施して変調信号を生成し、各素子アンテナから送信する方法である<sup>(3)</sup>。これによって各素子アンテナから放射された変調信号は通信方向で合成したときに初めて有意な信号となるが、通信方向外では不規則な信号となる。このように指向性変調技術は通信可能となる角度範囲を限定する技術である。

指向性変調を実現する移相器や可変減衰器の励振分布を算出する方法が検討されている。従来は遺伝的アルゴリズムを用いた最適化手法によって励振分布を算出しており<sup>(3)</sup>、計算量が多いという課題がある。それに対し、通信装置の計算処理能力に依存しない簡易な励振分布算出方法の一つに和差パターン合成法がある<sup>(4)(5)</sup>。

### 2.2 和差パターン合成法

図1は和差パターン合成法の原理を示した図である。和差パターン合成法は、所望信号を送信するための所望信号ビームと干渉信号を送信するための干渉信号ビームとを同時形成する方法である。

所望信号ビームはビームパターンのピークが通信方向となるようなビーム形状に成形する。このようなビームパターンは和パターンと呼ばれる。一方、干渉信号ビームは

通信方向にビームパターンの零点を向けるとともに、それ以外の方向では所望信号ビームの利得よりも干渉信号ビームのそれが高くなるようなビーム形状に成形する。通信方向が零点となるビームパターンは差パターンと呼ばれる。これらの和差パターンを同時に形成することによって、送信方向によって所望信号と干渉信号の電力比を変え、通信可能な角度幅を通信方向近傍に限定できる。具体的には、通信方向近傍では干渉信号ビームよりも所望信号ビームの利得が高く、所望信号が干渉信号よりも強い信号電力で送信されるため通信可能である。一方、所望信号ビームのサイドロブ方向では所望信号ビームよりも干渉信号ビームの利得が高く、干渉信号が所望信号よりも強い信号電力で送信されるため通信不能となる。

図2は和差パターン合成法を用いる秘匿通信アレーアンテナのブロック構成図である。図1に示す所望信号ビームと干渉信号ビームとを形成するそれぞれの励振分布に、所望信号と干渉信号をそれぞれ乗積し、それらを合成して励振分布を算出する。この励振分布に基づき、移相器及び可変減衰器によって各素子アンテナから送信される搬送波の振幅位相を制御する。なお算出された励振分布によって形成されるビームパターンは、図1の各ビームに所望信号又は干渉信号を乗積し、位相値を考慮して合成したパターンとなる。

従来のアレーアンテナはビームピーク方向を変える際に励振分布を切り換えるが、秘匿通信アレーアンテナでは所望信号が切り換わるたびに励振分布を切り換えるため、移相器や可変減衰器を高速に制御する必要がある。一方で通信方向での受信信号は従来のアレーアンテナと同様であるため、受信機は従来と同一でよい。したがって、秘匿通信アレーアンテナは送信機の変更だけで通信可能な角度範囲を限定できる。

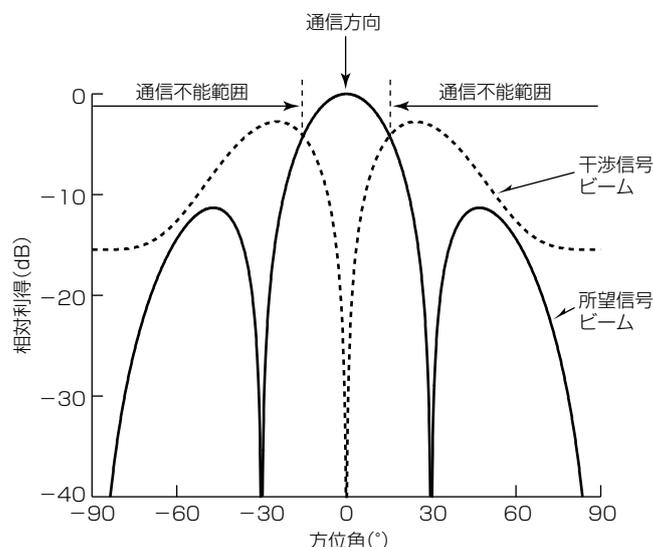


図1. 和差パターン合成法の原理

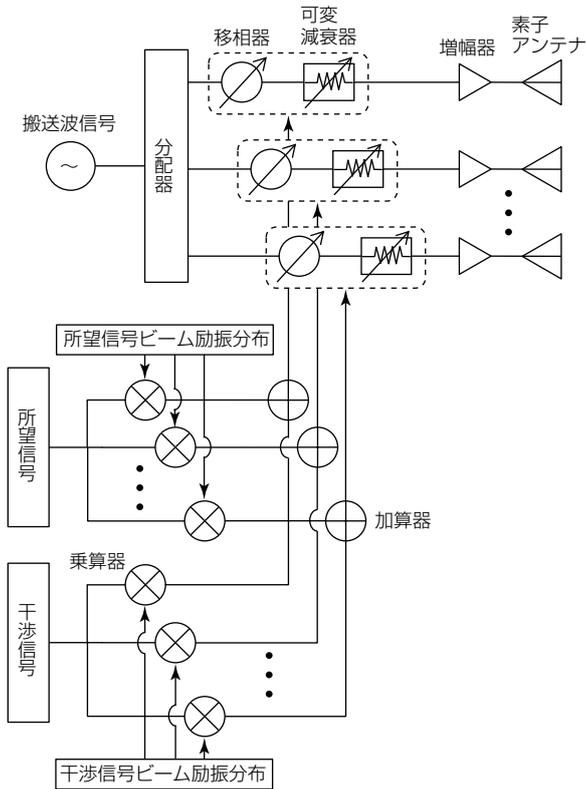


図2. 秘匿通信アレーアンテナのブロック構成

### 3. 特性評価

表1にシミュレーション諸元を示す。4素子アレーアンテナを用いて、QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)で通信する場合の通信性能を評価する。

#### 3.1 ビームパターン

図3及び図4は各QPSKシンボルを送信するビームパターンの振幅特性及び位相特性である。ビームパターンは図1に示す各ビームに所望信号又は干渉信号を乗積し位相値を考慮して合成したものである。図3及び図4中の凡例はQPSKの各シンボルの位相値を表している。これらの図に示す4種類のビームパターンを所望信号に合わせて切り換える。ここで、方位角0°の通信方向での振幅位相に着目すると、振幅は図3から各シンボルで等振幅、位相値は図4から45°, 135°, -135°, -45°になっており、QPSKの信号点配置と一致することが分かる。図5は通信方向(0°方向)と通信方向外(30°方向)で受信される信号点配置を示した図である。この図は図3と図4での各方位角の振幅位相値を複素平面上で描画したものである。この図のとおり、通信方向ではQPSKの信号点配置となるが、通信方向外の30°方向ではシンボル点が一点に集約し不規則化されている。このように指向性変調技術によって信号点配置に角度依存性を持たせることが可能になる。

#### 3.2 ビット誤り率の角度特性

次に信号点配置の角度依存性による通信性能への影響を

表1. シミュレーション諸元

項目	内容
アンテナ構成	4素子, 半波長間隔リニアアレーアンテナ
素子アンテナ	無指向性
通信方向	アンテナ正面(0°方向)
通信方向SNR	20dB
通信方式	QPSK
干渉信号	位相: 0°

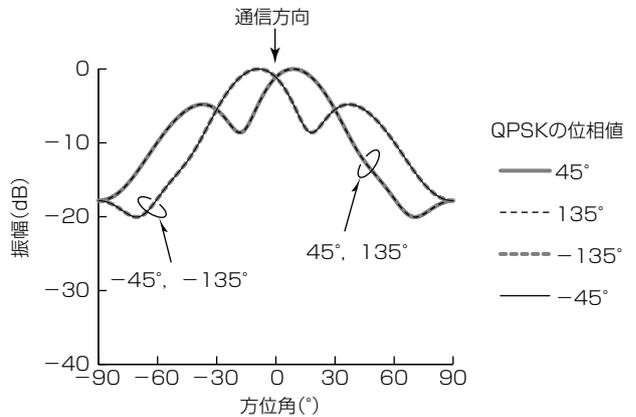


図3. ビームパターンの振幅特性

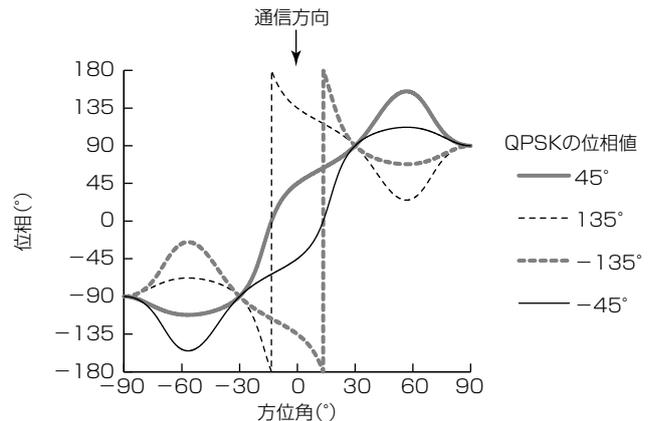


図4. ビームパターンの位相特性

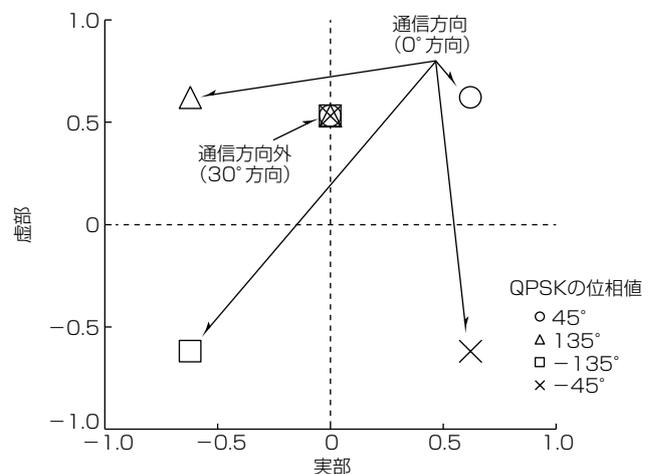


図5. 受信信号点配置(通信方向と通信方向外の違い)

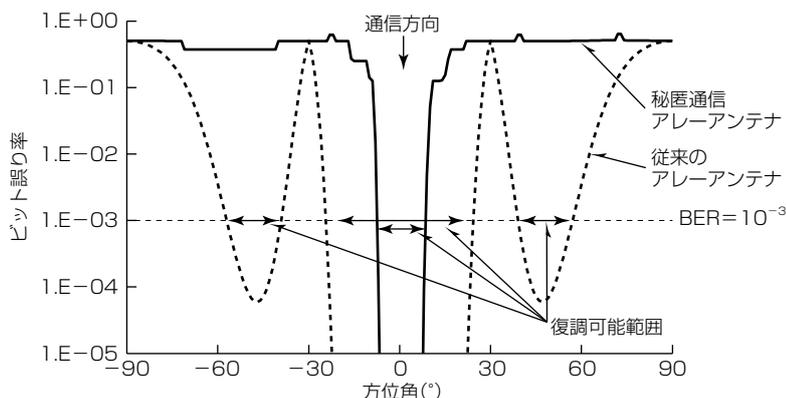


図6. ビット誤り率の角度特性

確認するために、熱雑音環境下のビット誤り率(BER)特性を評価する。図6は通信方向(0°方向)の信号対雑音電力比(SNR)を20dBとし、受信地点を送信局から距離一定の半円状の地点に変化させた場合のBER特性である。比較対象として、通信方向(0°方向)にビーム走査した従来のアレーアンテナの角度特性も示す。

従来のアレーアンテナの場合、ビームパターン振幅の変化に従って受信地点でのSNRが変わるため、BERは通信方向から外れるにつれて徐々に劣化しサイドローブのピーク方向で極大になる。このようにサイドローブ方向でBERが改善し、通信方向外の方角でも通信内容を復調されてしまう。一方、秘匿通信アレーアンテナでは、従来のアレーアンテナのサイドローブ方向ではBERは劣化したままで、BERが良好となる角度範囲を通信方向近傍に限定できることが分かる。ここでBER=10<sup>-3</sup>以下となる角度幅を復調可能範囲と定義すると、復調可能範囲は従来のアレーアンテナでは84°、秘匿通信アレーアンテナでは15°となる。このように秘匿通信アレーアンテナを用いることで復調可能範囲を従来比約1/5に限定でき、限られた方向だけで通信を可能にすることを確認した。

#### 4. む す び

アレーアンテナを用いて復調可能範囲を限定する方式として和差パターン合成法を用いた秘匿通信アレーアンテナを示し、通信性能を評価した。その結果、このアンテナによって従来のアレーアンテナと比較して復調可能範囲を狭くでき、限られた方向だけで通信を可能にすることを示した。今後は暗号技術とこの技術の融合などについても検討し、無線通信システムの更なる安全性向上を目指して取り組んでいく。

#### 参 考 文 献

- (1) Chen, X., et al.: A Survey on Multiple-Antenna Techniques for Physical Layer Security, IEEE Communications Surveys & Tutorials, **19**, No.2, 1027~1053 (2017)
- (2) 笹岡秀一：電波伝搬特性に基づく物理層情報セキュリティ, 電子情報通信学会技術研究報告, A・P2015-21 (2015)
- (3) Daly, M. P., et al.: Directional Modulation Technique for Phased Arrays, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, **57**, No.9, 2633~2640 (2009)
- (4) Fujimoto, M., et al.: Limited Area Communication Using Sum & Differential Patterns, 2015 International Symposium Antennas and Propagation, 1~2 (2015)
- (5) 栗山 侑, ほか：和差パターンを用いた指向性変調アレーアンテナにおける通信領域の狭域化手法, 電子情報通信学会技術研究報告, A・P2016-153 (2017)