

空間重畳型多値変調用アレイアンテナの研究

日大生産工(院) ○大窪 崇宏

日大生産工 田中 将義

1 まえがき

複数の同一周波数のビームを空間重畳する技術は、多値変調波の高効率電力増幅等に有効である。その際ビーム間の利得・位相差が小さいことが要求され、筆者等はフェーズドアレイのアンテナ素子を同心円状に配置することで多ビームの空間重畳が実現可能であることを報告した⁽¹⁻¹⁰⁾。

本報告では、2ビームの空間重畳合成の実験結果ならびに、利得の向上を目的とし、上記アレイアンテナと反射鏡アンテナを組み合わせたシステムを提案し、空間重畳可能範囲の検討結果を示し、本システムで空間重畳合成が実現する見通しを得たことを報告する。

2 空間ベクトル重畳合成

2.1 空間重畳型多値変調

従来の多値変調システム [32値振幅位相変調(32 APSK)]の構成と信号空間配置(変調波の振幅・位相関係)をFig. 1示す。

伝送容量の大きい32 APSKや64値直交振幅変調(64 QAM)波等の多値変調波は振幅変動が大きく、電力増幅器(HPA)の効率の良い非線形領域で増幅させると伝送特性が劣化する。伝送劣化を抑えるには、HPA特性を線形性までバックオフすることが行われるが、増幅効率の低下が発生する。

8相位相変調(8 PSK)や4相位相変調(QPSK)等の振幅変動の小さい変調波を個別に高効率電力増幅を行い、ベクトル重畳合成することでHPAの高効率での動作を可能となる⁽¹⁻¹²⁾。

Fig. 2のように重畳合成をマイクロ波(RF)回路で行う方法は、合成器と伝送路による送信電力の減衰や耐電力の制限により不可能である。そこで、回路での合成ではなく、Fig. 3に示すように信号を個別のアンテナで放射し、その複数のビームを空間で合成する空間重畳合成を提案している⁽¹⁻¹²⁾。本空間重畳合成を適用したシステム例をFig. 4に示す。

Fig. 4では変形8 PSKとQPSKの2波を合成することで多値変調波である32 APSKを高効率に作ることが可能である。

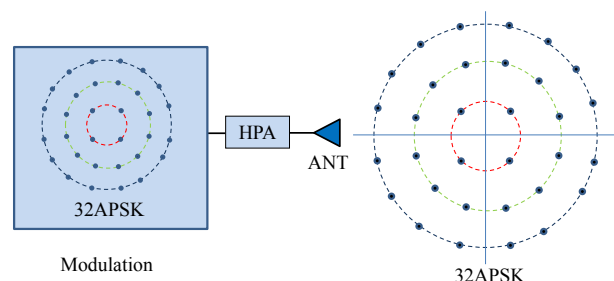
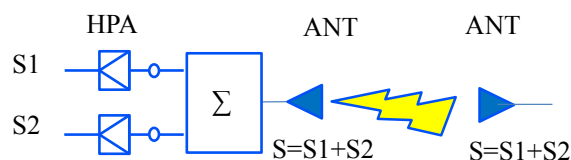
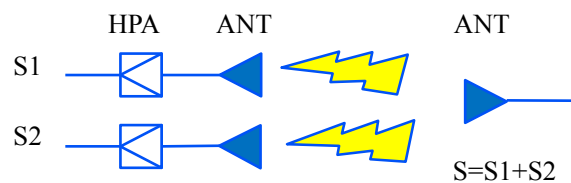


Fig. 1 Conventional multilevel modulation transmitter.



S: Multilevel Modulation Wave

Fig. 2 Superposition by RF circuit.



S: Multilevel Modulation Wave

Fig. 3 Spatial superposition of RF waves.

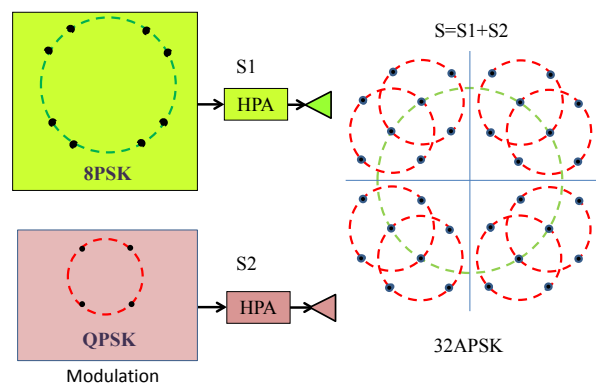


Fig. 4 Two-beam spatially superposed 8x4=32 APSK system.

2.2 受信点におけるビームの経路差による空間重畳誤差

複数のビームを空間領域でビームを合成する空間重畳合成は、回路での合成と違い損失はない。しかし、空間合成には受信点におけるビームの経路差により空間重畳誤差が発生する問題がある。これは、Fig. 5に示すように、各送信点の位置の違い d により送信点から受信点までの経路差 $d \cdot \sin \theta$ が発生することで信号空間配置が変化し、変調波の波形が劣化する。Fig. 6では、2つの個別アンテナで合成する際のアンテナ正面方向からの角度に対する位相誤差を示す。

この結果、アンテナ正面からの角度増加とともに位相誤差も比例関係で大きくなり、アンテナ間隔 d が大きいほど位相誤差が大きくなる。位相誤差を小さくするには経路差を縮小することが重要である。

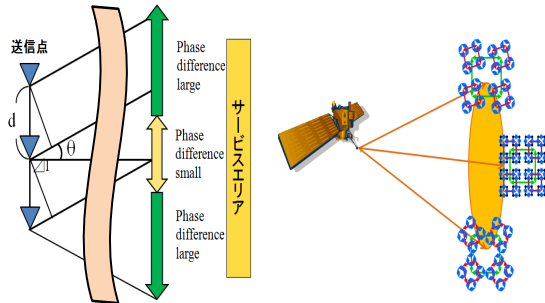


Fig. 5 Spatial superposition errors due to path difference.

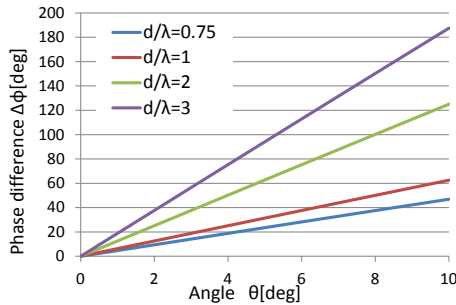


Fig. 6 Angle from antenna boresight vs. phase difference in case of 2 antenna elements at interval d . (λ = wave length)

3. 空間重畳合成用アンテナの設計

3.1 ビームの放射パターン

アレイアンテナの放射ビームパターンの総合特性 $G(\phi, \theta)$ は(1)式で与えられる。ここで、 $G_A(\phi, \theta)$ はアレイファクタ、 $G_p(\phi, \theta)$ は各アンテナ特性である。

$$G = G_A(\phi, \theta) \times G_p(\phi, \theta) \quad (1)$$

同特性のアンテナ素子を使用することを前提とすると、ビーム間の誤差を考える場合、アレイファクタ $G_A(\phi, \theta)$ の差に着目すれば良い。各ビームのアレイファクタのパターンは(2)(3)式より与えられる。

$$G_A(\phi, \theta) = \sum_{k=0}^{K-1} A_{ki} \exp \left\{ j \left(\phi_{ki} - \frac{2\pi}{\lambda} R_i \cos(\phi - \phi_{ki}) \sin \theta \right) \right\} \quad (2)$$

$$\phi_{ki} = \frac{2\pi}{\lambda} R_i \cos(\phi_0 - \phi_{ki}) \sin \theta_0 \quad (3)$$

ここで ϕ は方位角、 ϕ_0 は目標方向への方位角、 θ はボアサイトからの角度、 θ_0 は目標方向へのボアサイトからの角度、 A_{ki} は振幅、 K は素子数、 R_i は半径、 N は円の多重数、 λ は波長である。

3.2 3+3素子構成の各ビームの利得・位相パターン

1重の円に2ビーム毎に3素子を交互に配置した3+3素子構成 (Fig. 7)の空間重畳合成を検討した。アレイアンテナの実装性を考慮して、アンテナ素子間隔 $d=0.75 \times \lambda$ にした構成を検討した。

Fig. 8にBeam-1, 2ごとのアレイファクタの遠方界利得と位相パターンを示す。

Beam-1, 2のGain patternより、ボアサイト方向に最大利得が形成されていることが確認できる。Phase patternでは θ が大になると差が存在する。

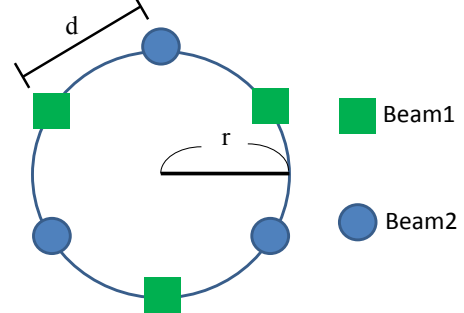
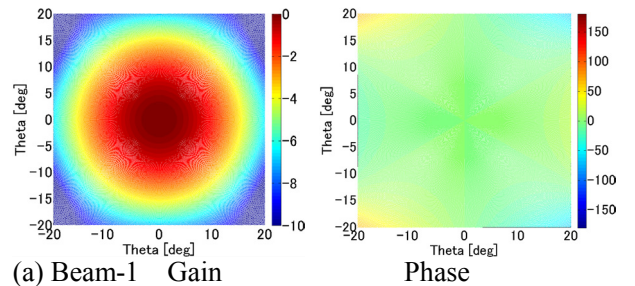
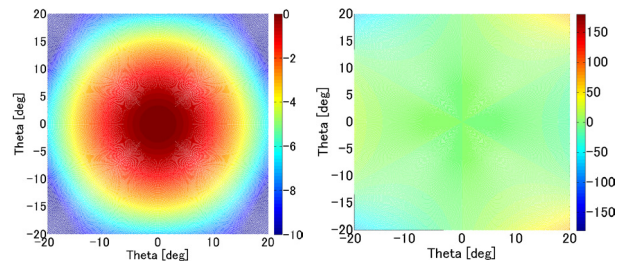


Fig. 7 Layout of feed with 6 (=3+3) elements



(a) Beam-1 Gain

Phase



(b) Beam-2 Gain

Phase

Fig. 8 Beam pattern characteristics of 6 (=3+3)-element antenna.

3.3 3+3素子構成2ビーム間の利得・位相誤差

3.1で示したBeam-1とBeam-2の2ビーム間の利得と位相の誤差をFig. 9に示す。

3+3素子構成時において、角度 $\theta=11$ [degree] (サービエリア半径 7×10^3 [km]) 以内で、32 APSKの伝送特性上許容される振幅誤差0.5 [dB]以下、位相誤差5 [degree]以下⁽⁷⁾を実現した。

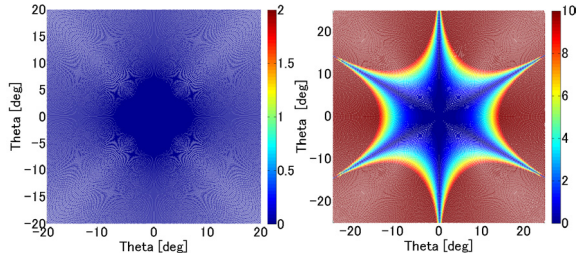


Fig. 9 Gain and phase differences between two beams.

4. 空間重畳合成の実験

3で示した設計法に基づき製作した2ビームアレイアンテナを用いて空間重畳合成の実証実験を行った。

変調器、分配器 (DIV), 可変減衰器 (V-ATT), 可変位相器 (V-Ph), フェーストアレイアンテナを組み合わせた実験系の構成を Fig. 10 (a) に示す。実証実験では、3+3 ではなく、2+2 のアレイアンテナを使用した。半径 $R=0.6\lambda$ の円周上に4個の素子を間隔 $d=0.85\lambda$ に配置した。Fig. 10 (b) にアレイアンテナの外観を示す。この構成において2.5 [GHz]の変形8 PSK 変調波とQPSK 変調波の空間重畳合成を行い、20 [m] 離れた点で合成波を受信・復調した。

4.1 信号空間配置

2ビームを空間重畳した受信波を復調した時の信号空間配置を Fig. 11 (a) に示す。この信号配置図より、Fig. 4 に示す32 APSK 変調波が空間重畳合成で実現できることを実験により確認した。

4.2 合成後のアイパターン

重畳合成波の受信信号の同相成分のアイパターンを Fig. 11 (b)に示す。

アイ(目)が7つあり、これはFig. 11 (a)の信号配置図に描かれた信号の横軸の値が(7+1)通りあることを表している。

5 フェースト反射鏡アンテナを用いた空間重畳合成

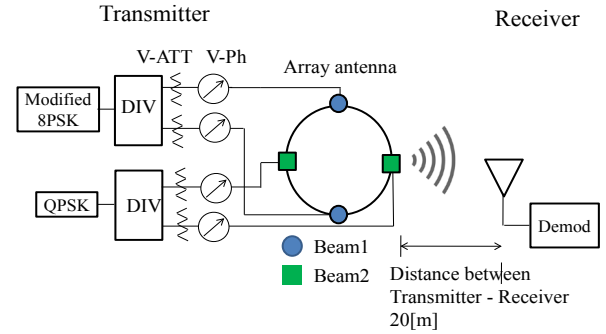
利得向上を目的として、フェーストアレイアンテナと反射鏡アンテナを組み合わせたシステムを検討した。

5.1 本システムの解析条件

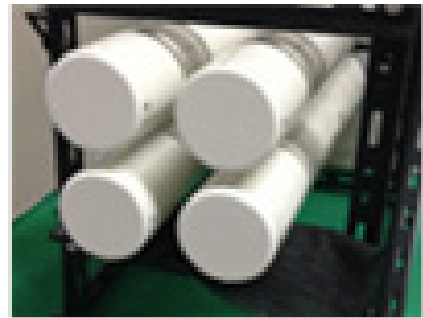
Fig. 7に示した3+3素子構成アレイをfeedとして、反

射鏡と組み合わせたシステム構成をFig. 12に示す。

半径 $R=0.5\lambda$ の円周上に3+3個の素子を交互かつ等間隔に配置した。開口径 $D=40\lambda$, 焦点距離 50λ の反射鏡を用い、 $D'=0.5D$ のオフセットを行っている。焦点から前方の離焦点Lにフェーストアレイアンテナを配置し、ラジアル方向に放射する。

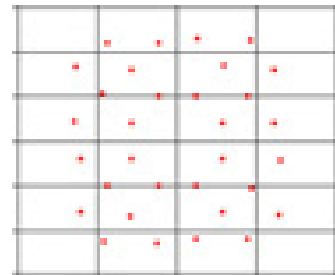


(a) Experimental system for spatially superposed 32 APSK

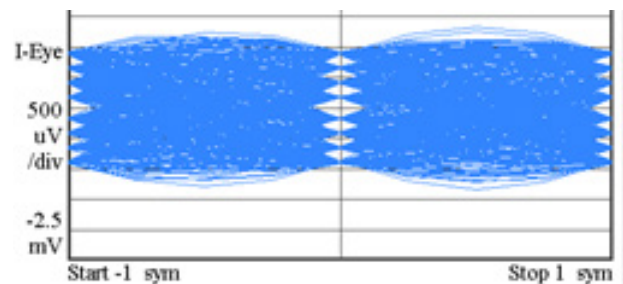


(b) Array antenna

Fig. 10 Configuration of experimental system.



(a) Constellation diagram of received signal



(b) Eye pattern (I-channel)

Fig. 11 Experimental results of 32 APSK

5.2 本システム構成の各ビームの利得・位相パターン

離焦点 $L=10\lambda$ 時の空間重畳合成を検討した。

Fig. 13にBeam-1, 2ごとの遠方界アレイファクタの利得と位相パターンを示す。

Beam-1, 2のGain patternより, ボアサイト方向で44 [dB], 半値幅2.5 [degree]を実現している。

5.3 2ビーム間の利得・位相誤差

5.2で示したBeam-1とBeam-2の2ビーム間の利得と位相の誤差をFig. 14に示す。

本システム構成時において, 3 [degree] (静止衛星通信時のサービスエリアの半径が1,887 [km]) 内で振幅誤差は許容誤差0.5 [dB]以下, 位相誤差は許容誤差5 [degree]以下⁽⁷⁾を実現できる。

6 まとめ

本報告では, ①同心円状に配置したアレイアンテナの設計法, ②アレイアンテナを用いた2ビームの空間重畳合成の実証実験, ③利得向上を目的として反射鏡とアレイアンテナを組み合わせたシステム構成の検討を行った。

その結果, アレイアンテナの実験において, 32 APSK 変調波の空間重畳合成が実現できることを確認した。

反射鏡と組み合わせたシステムにおいて, サービスエリアの半径1,887 [km]以内で振幅許容誤差0.5 [dB], 位相許容誤差5 [degree]を満たす空間重畳合成を実現する見通しを得た。

この結果, 高利得のアンテナを用いて, 空間重畳合成多値変調波が実現できることを示した。

[謝辞]

本研究はJSPS科研費24560480の助成を受けたものです。

[参考文献]

- (1)M.Tanaka, H.Madate, AIAA, ICSSC-2010-8681, 2010, August.
- (2)間舘, 田中, 信学技報, SAT2010-85,2011-2
- (3)M.Tanaka, H.Madate, AIAA,ICSSC2011, AIAA-2011-8026, 2011, Nov.
- (4)飛内, 田中, 信学会サイエティ大,B-3-18,2011
- (5)飛内, 田中, 総合大,B-3-18,2012
- (6)M.Tanaka,T.Watanabe, & M.Tobinai, AIAA ICSSC2012, 6-1, pp1-10, Sept.
- (7)M.Tanaka, T.Ohkubo., AIAA, ICSSC2013, AIAA2013-5677, Oct., 2013
- (8)大窪, 田中, 信学会サイエティ大,B-3-13,2013
- (9)大窪, 田中, 信学総全大,B-3-19,2014
- (10)大窪, 田中, 信学会サイエティ大,B-3-14,2014
- (11)野口, 田中, 信学会サイエティ大,B-3-30,2013
- (12)山口, 田中, 信学会サイエティ大,B-3-9,2014

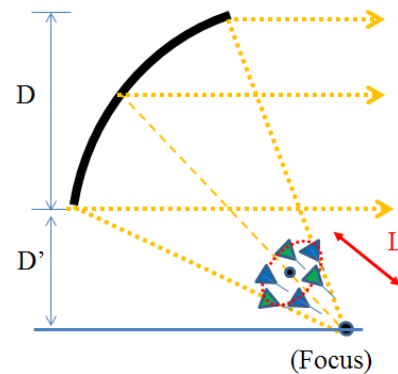


Fig. 12 Configuration of phased array fed reflector antenna for spatial superposition

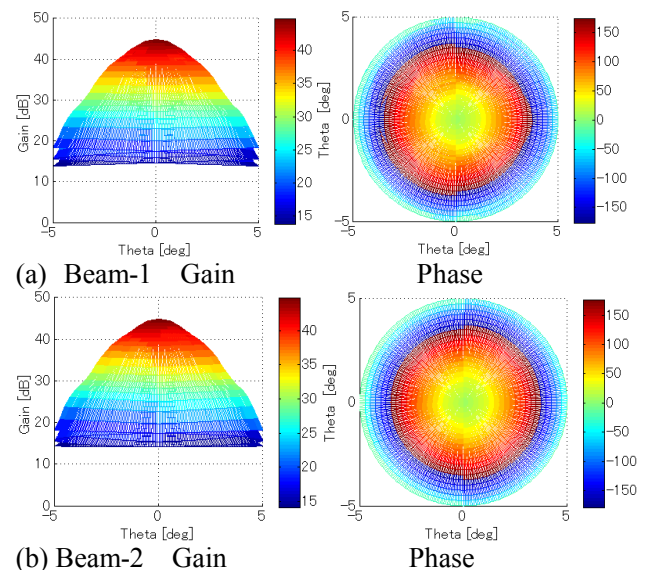


Fig.13 Beam pattern characteristics of 3+3 element antenna.

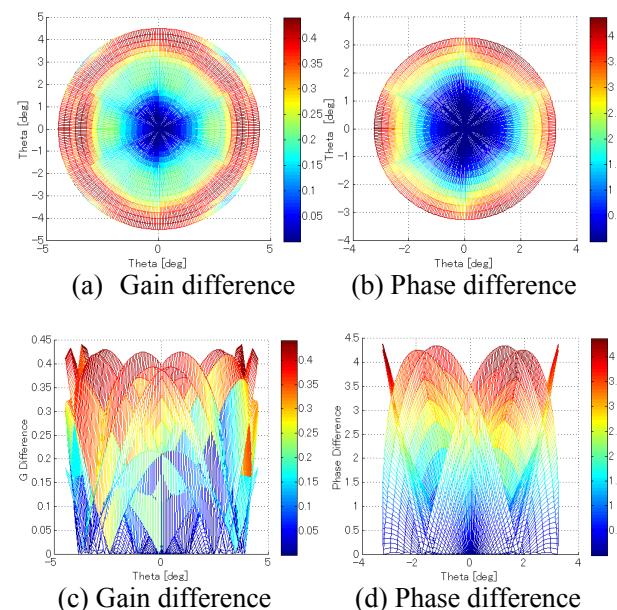


Fig. 14 Gain and phase differences between two beams.