

マイクロ波空間重畳合成用アレイアンテナの検討

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⁽¹⁻⁹⁾。

本報告では、2ビームの空間重畳合成を4個のアンテナ素子で構成する簡易なアレイアンテナを提案し、ビーム方向可変時の空間重畳可能範囲を検討した結果を示し、空間重畳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

振幅変動の小さい変調波を個別に電力増幅を行い、重畳合成することで効率の良い非線形領域での動作を可能とする。しかし、Fig.1のように重畳合成をマイクロ波回路を用いて行う場合では、回路上の合成器と伝送路による送信電力の減衰が生じるため、回路での重畳合成は実現が不可能となる。そこで、回路での合成ではなく、Fig.2に示すように低消費電力化を目的とし、空間で合成する空間重畳合成を検討した。

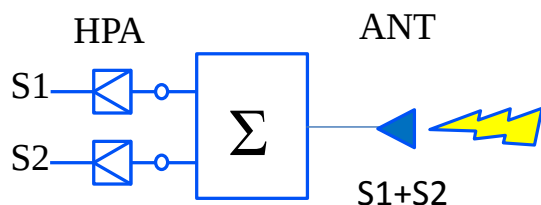


Fig.1 Superposition by RF circuit.

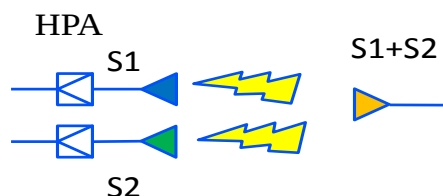


Fig.2 Spatial superposition.

2.2 2,3ビーム空間ベクトル重畳合成の適用例

これまで検討していた3ビームを合成することにより実現可能となる適用例をFig.3に示す。

Fig.3では2つのQPSKとBPSKを合成することで多値変調波である32APSKを作ることが可能となることを示している。

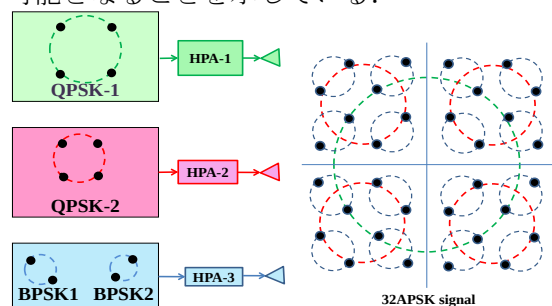


Fig.3 Application of three-beam spatial superposition (4x4x2 APSK).

今回はFig.4のように8値位相偏移変調(8PSK)と4位相偏移変調(QPSK)を合成することにより、2ビームでも多値変調波の32値振幅位相変調(32APSK)を作ることが可能となることを示している。

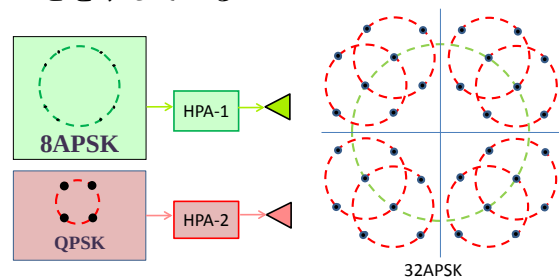


Fig.4 Application of two-beam spatial superposition (8x4 APSK).

2.3 受信点におけるビームの経路差による空間重畳誤差

複数のビームを重畳合成する技術として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に示すようにそれぞれ異なる送信点から受信点までの経路差が各送信点の位置

の違いにより異なることでビームの位相が回転する。Fig.6では、2つの個別アンテナで合成したときの位相誤差について示し、アンテナ角度に対する位相誤差の検討を行った。

この結果、角度の増加とともに位相誤差も比例関係で大きくなり、経路差が大きいほど位相誤差が大きい傾向が確認でき、位相誤差を小さくするには経路差を改善することが重要である。

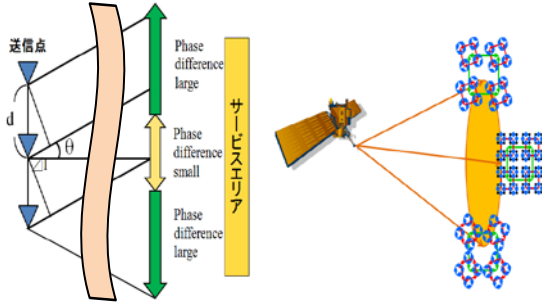


Fig.5 Spatial superposition errors due to path difference.

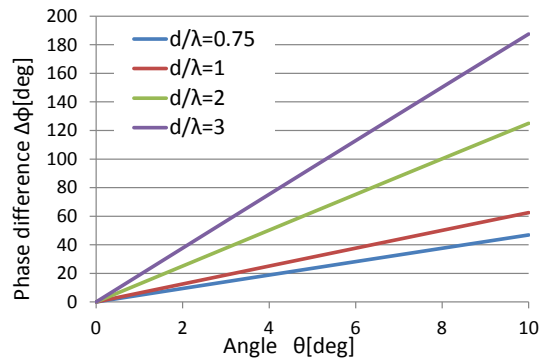


Fig.6 Angle vs. Phase difference (1+1 elements).

3 空間重畳合成用フェーズドアンテナ

3.1 リニアレイと提案するレイ配置

空間重畳合成を行う場合、2ビームの送信点の位置が異なり、素子間隔が広がると経路差によりビームの位相回転が大きくなる。

そこで、この位相誤差を低減するレイ配置として、2つのビームの等価的な送信点が同一になるようFig.7のような同心円状のレイ配置を提案した。⁽¹⁰⁾

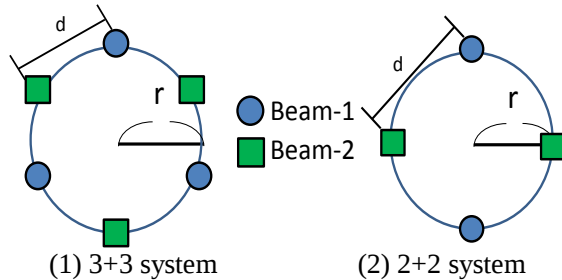


Fig.7 Array layout for spatial superposition.

3.2 ビームの放射パターン

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、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。

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

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

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 は円の多重数である。

4 固定ビーム用4, 6素子構成の検討

1重の円に2ビーム毎に3素子を交互に配置したと6素子構成と2ビーム毎に2素子を交互に配置したと4素子構成を比較検討した。

4.1 6素子構成の各ビームの利得・位相パターン

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ごとの遠方界レイファクタの利得と位相パターンを示す。

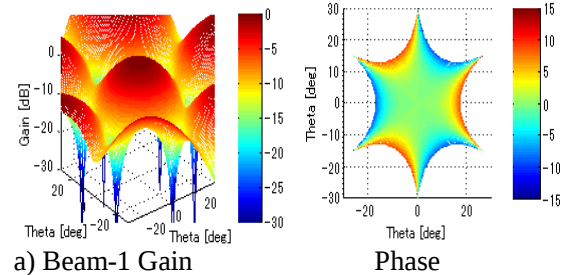
Beam-1,2のGain patternより、ボアサイト方向である中心に方向性のある高い利得が生じていることが確認できる。Phase patternでは少し回転している様子が見て取れる。

4.2 6素子構成上2ビーム間の利得・位相の誤差

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。

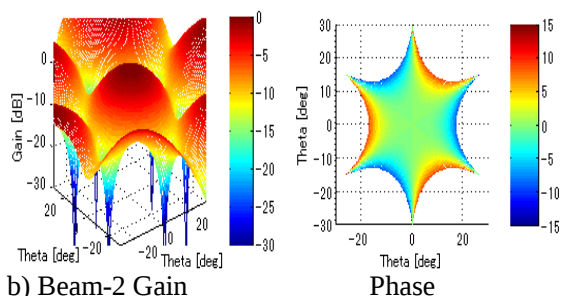
6素子構成時の静止衛星通信時のサービスエリア半径と振幅・位相誤差の関係をFig.10に示す。

6素子構成時において、サービスエリア半径 7×10^3 km以上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 [deg]以下を実現した。

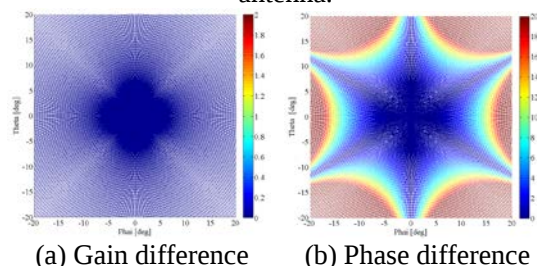


a) Beam-1 Gain

Phase



b) Beam-2 Gain
Fig.8 Beam pattern characteristics of 6-element antenna.



(a) Gain difference (b) Phase difference
Fig.9 Gain and phase differences among two beams for 6-element antenna.

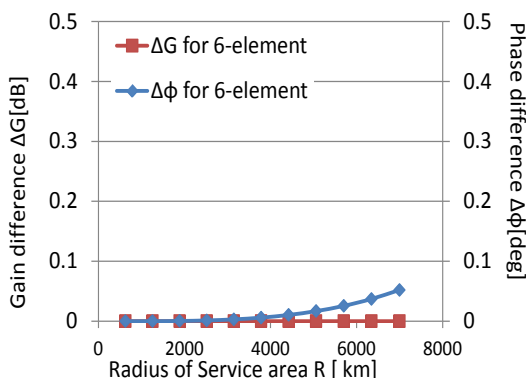


Fig.10 Amplitude and phase errors vs. spatial superposition area. (6-element antenna)

4.3 4素子構成の各ビームの利得・位相パターン
半径 $r=0.53\lambda$ の円周上に $N=1$ として4個の素子を間隔 $d=0.75\lambda$ (波長)に配置したフェーズドアレイアンテナを用いて、2ビームの空間重畳を行った。

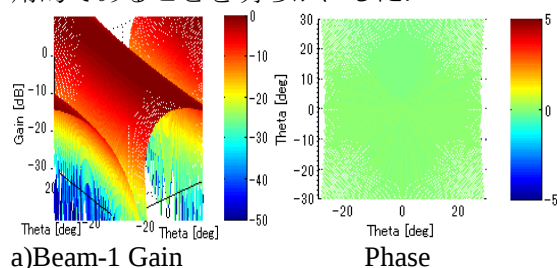
Fig.11にBeam-1, 2の遠方界レイアウトの利得と位相パターンを示し、Beam-1, 2のGain patternより、ボアサイト方向である中心に方向性のある高い利得が生じていることが確認できる。Phase patternでは角度 $-20^\circ \sim 20^\circ$ まで変動が全く見られない。

4.4 4素子構成上2ビーム間の利得・位相の誤差
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. 12に示す。

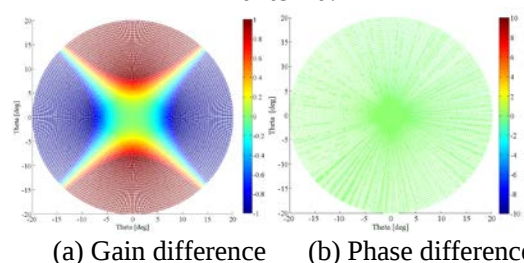
4素子構成時のサービスエリア半径と振幅・位相誤差の関係をFig.13に示し、Fig.13よりサービスエリア半径 4×10^3 kmにおいて、振幅許容誤差0.5 [dB]以下、位相許容誤差5 [deg]以下を実現できる。

6素子構成と比較するとカバーエリアが小さく

なるものの半径 4×10^3 kmをカバーでき、十分実用的であることを明らかにした。



a) Beam-1 Gain (b) Beam-2 Gain
Fig.11 Beam pattern characteristics of 4-element antenna.



(a) Gain difference (b) Phase difference
Fig.12 Gain and phase differences between two beams for 4-element antenna.

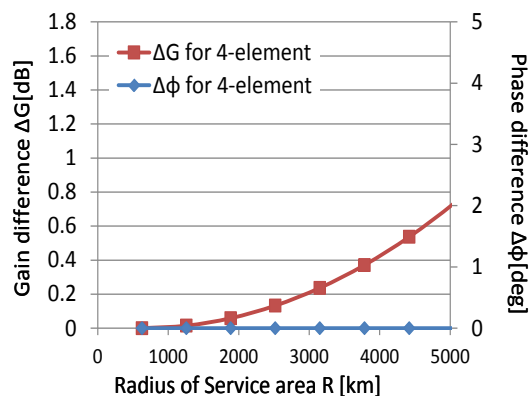


Fig.13 Amplitude and phase errors vs. spatial superposition area. (4-element antenna)

5 ビームステアリング時のビームパターン

5.1 ステアリング

給電信号の位相を変化させることで主ビームの方向を可変できる。

ビームの放射方向を変更することでアクセス衛星の切り替え、サービスエリアの変更が可能となる。(Fig.14)

4, 6素子構成アレイアンテナを用いて、ステアリング角 $\theta_0=3^\circ$ の2ビームの空間重畳を行った。

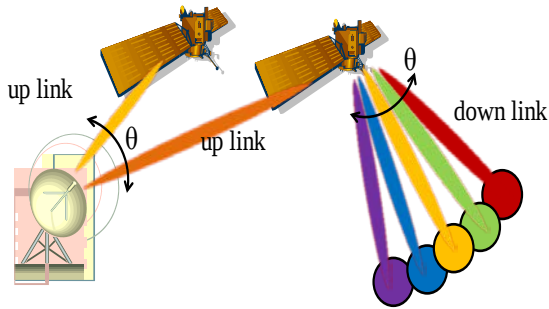


Fig.14 Image of beam steering.

5.2 6素子構成時のステアリングによる影響

ステアリング角 $\theta_0=3^\circ$ 時の6素子構成時のサービスエリア半径とBeam-1,2間の振幅・位相誤差の関係をFig.15に示す。Fig.15よりステアリング角 $\theta_0=3^\circ$ 時に、サービスエリア半径 $1.5 \times 10^3 \text{ km}$ において振幅誤差0.5 [dB]以下、位相誤差5 [deg]以下である。

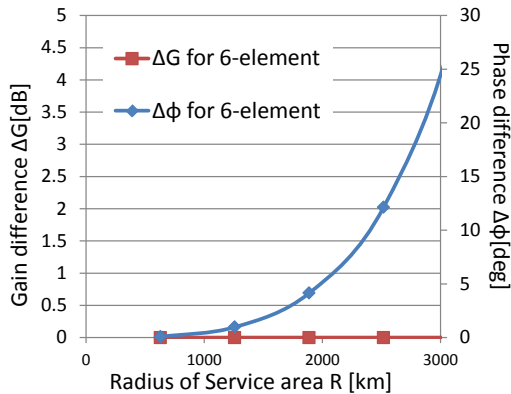


Fig.15 Amplitude and phase errors vs. spatial superposition area.
{6-element antenna (steering angle $\theta=3^\circ$)}

5.3 4素子構成時のステアリングによる影響

ステアリング角 $\theta_0=3^\circ$ 時の4素子構成時のサービスエリア半径とBeam-1, 2間の振幅・位相誤差の関係をFig.16に示す。Fig.16よりステアリング角 $\theta_0=3^\circ$ 時に、サービスエリア半径 $1 \times 10^3 \text{ km}$ において振幅誤差0.5 [dB]以下、位相誤差5 [deg]以下である。

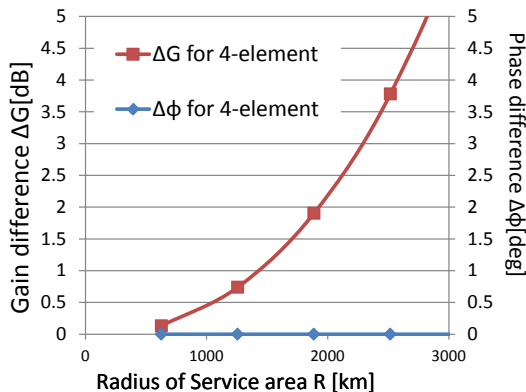


Fig.16 Amplitude and phase errors vs. spatial superposition area.
{4-element antenna (steering angle $\theta=3^\circ$)}

Fig.15, 16よりステアリングを行わない時と比較すると振幅・位相誤差は大きくなり、4, 6素子構成共にサービスエリア可能範囲が非常に小さくなるのがわかる。

6 まとめ

本報告では、2ビームの空間重畳合成を実現するアレイアンテナの構成を検討した。

4, 6素子構成である2ビーム空間重畳合成アレイアンテナにおいて、ステアリング時の条件も含む空間重畳可能範囲を検討した。

その結果、6素子構成において、サービスエリア半径 $7 \times 10^3 \text{ km}$ 以上の範囲において、振幅誤差0.5 [dB], 位相誤差5 [deg]を実現でき、指向角度を $\theta_0=3^\circ$ 振った場合では、サービスエリア半径 $1.5 \times 10^3 \text{ km}$ で振幅誤差0.5 [dB], 位相誤差5 [deg]以下を実現した。ステアリング時においても衛星通信において実用的な範囲を実現可能であることを明らかにした。

4素子構成アレイアンテナにおいて、サービスエリア半径 $4 \times 10^3 \text{ km}$ で振幅誤差0.5 [dB], 位相誤差5 [deg]を実現でき、指向角度を $\theta_0=3^\circ$ 振った場合では、サービスエリア半径 $1 \times 10^3 \text{ km}$ で振幅誤差0.5 [dB], 位相誤差5 [deg]以下を実現した。4素子構成は6素子構成に比べ、カバーサービスが小さくなるもののシステムの小型化, 簡易化が可能であり、固定ビームに使用する際、十分実用的な範囲を実現できる。

この結果、素子数の削減により、 $4 \times 10^3 \text{ km}$ までならより低コストでシステム簡易である4素子構成の2ビーム空間重畳アレイアンテナでもサービスエリアの確保を実現できる見通しを得た。

[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-2010-868 1, 2010, August.
- (2) 間館, 田中, 信学技報, SAT2010-85, 2011-2
- (3) 渡辺, 田中, 信学会サイエンス大, B-3-19, 2011
- (4) M.Tanaka, H.Madate, AIAA, ICSSC2011, AIAA-2011-8026, 2011, Nov.
- (5) 渡辺, 田中, 総合大, B-3-17, 2012
- (6) 飛内, 田中, 信学会サイエンス大, B-3-18, 2011
- (7) 飛内, 田中, 総合大, B-3-18, 2012
- (8) M.Tanaka, T.Watanabe, & M.Tobinai, AIAA ICSSC2012, 6-1, pp1-10, Sept.
- (9) 野口, 田中, 信学会サイエンス大, B-3-30, 2013
- (10) 大窪, 田中, 信学会サイエンス大, B-3-13, 2013