

3ビーム空間重畳合成用アレイアンテナの研究

日大生産工(院) ○飛内 雅之
日大生産工 田中 將義

1 まえがき

同一周波数の高周波信号(RF)を低損失でベクトル合成が可能となれば、多値変調波の高効率電力増幅が可能となる。合成法として、ハイブリッド回路等のマイクロ波回路で合成すると大きな損失を伴うが、空間で合成する場合には損失は発生しない。そこで筆者等は、これまで空間で2ビームおよび3ビームの重畳合成を提案してきた。(1-8)

空間重畳合成技術を用いて多ビームの合成を行う場合、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素子配置とすることで2ビーム、3ビームの空間重畳が実現可能であることを報告した。本報告では、あらたに3ビーム空間重畳合成における、ビーム方向可変時の空間重畳可能範囲を明らかにするとともに、固定ビームに使用するあらたな構成について検討し、その実現の見通しを得たので報告する。

2 空間ベクトル重畳合成

2.1 3ビーム空間ベクトル重畳合成の適用例

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.1, 2に示す。

Fig.1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。(2-5)

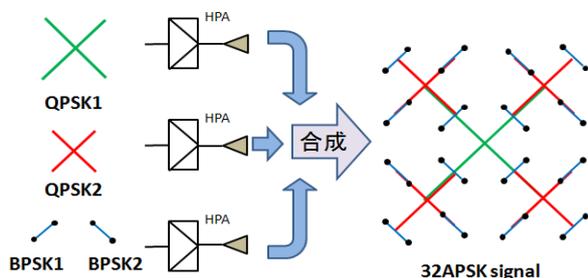


Fig.1 Application of spatial superposition (32APSK)

Fig.2では3つのQPSKを合成することにより、多値変調波の64QAMを作ることが可能となることを示している。これらが実現すれば、振幅変動が小さいために、電力増幅器の効率

の高い動作が可能となり低消費電力化が実現する。

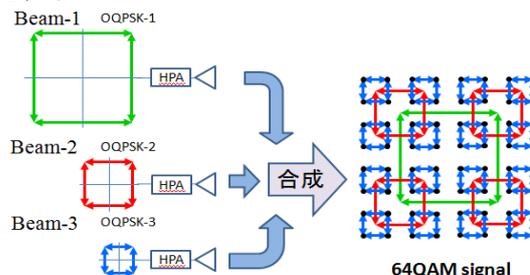


Fig.2 Application of spatial superposition (64QAM)

しかし、Fig.1, 2のような合成をFig.3に示す回路を用いて行う場合では、Fig.3(a)で示すように送信電力増幅後、各S1, S2, S3は1/2, 1/4, 1/4となり、合成すると1/4の減衰がみられ、Fig.3(b)のような電力合成器を用いた場合においても1/3の減衰がみられる。このように回路での重畳合成は大きな損失が生じるため、実現が不可能となる。そこで、回路での合成ではなく、Fig.4に示すように損失のない、空間で合成する空間重畳合成の実現を検討した。

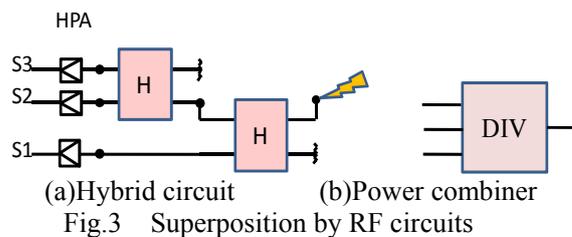
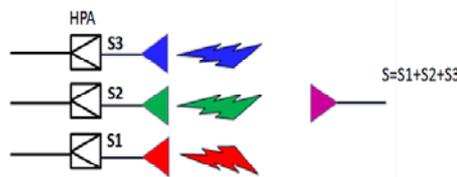


Fig.3 Superposition by RF circuits



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

3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位相差が発生する。

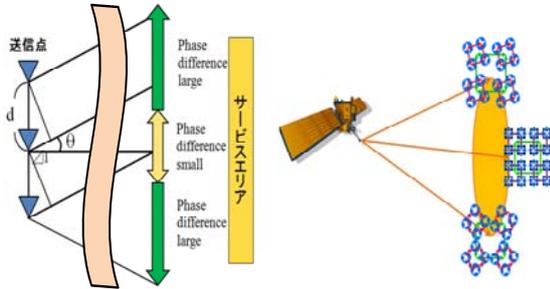


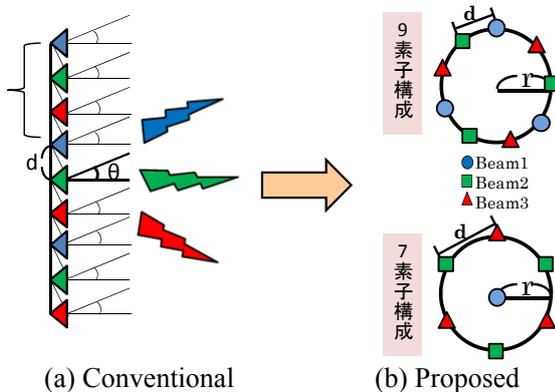
Fig.5 Spatial superposition errors due to path difference

3 空間重畳合成用フェーズドアレイアンテナ

3.1 リニアレイと提案するレイ配置

Fig.6の左図はリニアレイ配置である。このリニアレイ配置で空間重畳合成を行う場合、素子間隔が広がるため、3ビームの送信点が異なり位相誤差が発生する。

そこで、この位相誤差を低減するレイ配置として右図のような3ビーム空間合成用のレイ配置を提案した。(6-8)



(a) Conventional (b) Proposed

Fig.6 Array arrangement for spatial superposition

送信点が異なった場合、重畳合成時に生じた位相差によりビームの位相が回転する。そこで、常に経路差を小さくする必要がある。

3.2 3ビーム空間合成用レイ配置の特徴

空間重畳合成用のレイ配置としてFig.6の右図のような同心円状の素子配置のフェーズドアレイを提案した。この配置により3つのビームの等価的な送信点が同一になる。

シングルリングで、3ビームごとに3素子を交互に配置した合計9素子からなる構成とリングの真ん中に素子を一つ配置した合計7素子からなる固定ビーム用の構成を検討した。

4 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。

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

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

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。

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出来る。

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、サービエリアの変更が可能となる。(Fig.7)

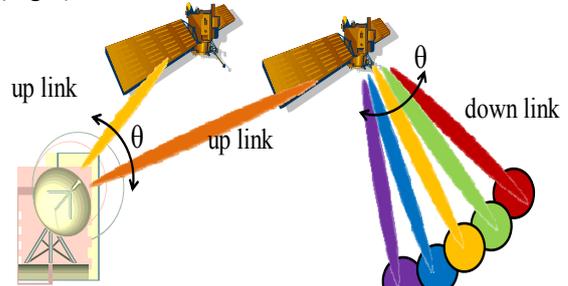


Fig.7 Image of beam steering

5.2 9素子構成時のステアリングによる影響

半径 $r=1.1\lambda$ の円周状に $N=1$ として9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用いて、ステアリング角 $\theta_0=3^\circ$ の3ビームの空間重畳を行った。Fig.8にBeam-1,2,3の遠方界アレイファクタの利得と位相パターンを示し、Beam-1,2,3間の利得と位相の最大誤差をFig.9に示している。

ステアリングを行わない9素子構成時のサービエリア半径と振幅・位相誤差の関係をTable1に示し、ステアリング時のサービエリア半径と振幅・位相誤差の関係をTable2に示す。

Table1よりステアリング角 $\theta_0=0^\circ$ 時に、サービエリア半径 $3.2 \times 10^3 \text{ km}$ において振幅誤差 $0.1[\text{dB}]$ 以下、位相誤差 $1[\text{deg}]$ 以下であり、振幅・位相誤差は非常に小さくなる。

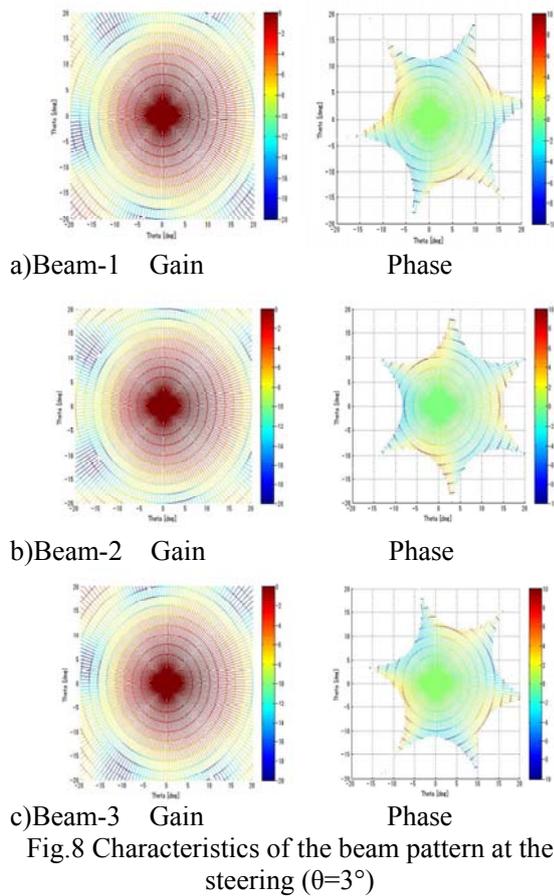
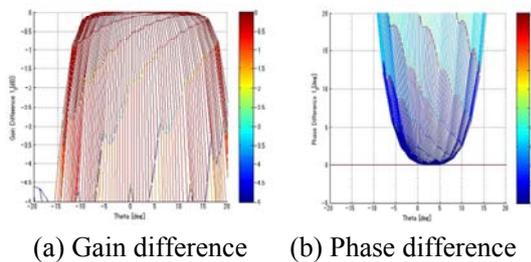


Fig.8 Characteristics of the beam pattern at the steering ($\theta=3^\circ$)



(a) Gain difference (b) Phase difference
Fig.9 Gain and phase difference among three beams at the steering ($\theta=3^\circ$)

Table1 Amplitude error and phase error vs. spatial superposition area. {9-element antenna ($\theta=0^\circ$)}

Service area (radius) [km]	Gain error [dB]	Phase error [deg]
2.0E+02	0.1[dB] 以下	0.5[deg] 以下
4.0E+02		
6.0E+02		
8.0E+02		
1.0E+03		
1.2E+03		
2.6E+03	0.5	0.5
3.2E+03	0.1	1
5.4E+03	0.1	5
6.6E+03	0.1	10
7.5E+03	0.1	15

ステアリング角 $\theta_0=3^\circ$ 時, Table2よりサービエリア半径 1.6×10^3 kmにおいて, 振幅誤差0.1[dB]以下, 位相誤差0.6[deg]以下を実現できる.

ステアリング角 $\theta_0=0^\circ$ 時と比較すると振幅・位相誤差は大きくなるものの, 実用の衛星通信上では十分なエリアをカバーできることを明らかにした.

Table2 Amplitude error and phase error vs. spatial superposition area. {9-element antenna ($\theta=3^\circ$)}

Service area (radius) [km]	Gain error [dB]	Phase error [deg]
2.0E+02	0.1[dB] 以下	0.5[deg] 以下
4.0E+02		
5.3E+02		
6.0E+02		
8.0E+02		
1.0E+03		
1.2E+03		
1.4E+03		0.5
1.6E+03	0.1	0.6
2.1E+03	0.2	1
2.6E+03	0.3	1.7
3.2E+03	0.4	2.7
4.2E+03	0.7	5
5.4E+03	1.1	9.7
5.5E+03	1.2	10
6.6E+03	1.7	17.5
7.5E+03	2.1	25

6 固定ビーム用7素子構成の検討

1重の円に3素子を交互に配置した2ビームと円の中心に1ビーム1素子を配置した7素子構成を検討した.

6.1 7素子構成の各ビームの利得・位相パターン

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.10にBeam-1,2,3ごとの遠方界利得と位相パターンを示す.

Beam-2,3のGain patternより, ホアサイト方向である中心に主ビームに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取れる.

提案しているレイ配置はBeam-1を中心に2ビームの等価的な送信点が同一になるようにしているが僅かに経路差による空間重畳誤差が影響している.

リングの中心に配置したBeam-1は素子が1つのためステアリングはできない.

6.2 3ビーム間の利得・位相の誤差

6.1で示したBeam-1と同特性を持つ2つのビームを合わせた3ビーム間の利得と位相の最大誤差をFig. 11に示す.

7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Table3に示す。

Table3より、7素子構成時において、サービスエリア半径 1.6×10^3 [km]以内で振幅誤差は0.1 [dB]以下、位相誤差は0.5 [deg]以内を実現した。9素子構成と比較するとサービスエリアが小さくなるものの振幅・位相誤差は非常に小さく十分実用的であることを明らかにした。

Table3 Amplitude error and phase error vs. spatial superposition area. (7-element antenna)

Service area (radius) [km]	Gain error [dB]	Phase error [deg]
2.0E+02	0.1 [dB] 以下	0.5 [deg] 以下
4.0E+02		
6.0E+02		
8.0E+02		
1.0E+03		
1.2E+03	0.1	
1.6E+03	0.3	0.5
2.8E+03	0.5	1
3.5E+03	1.3	5
5.8E+03	1.9	10

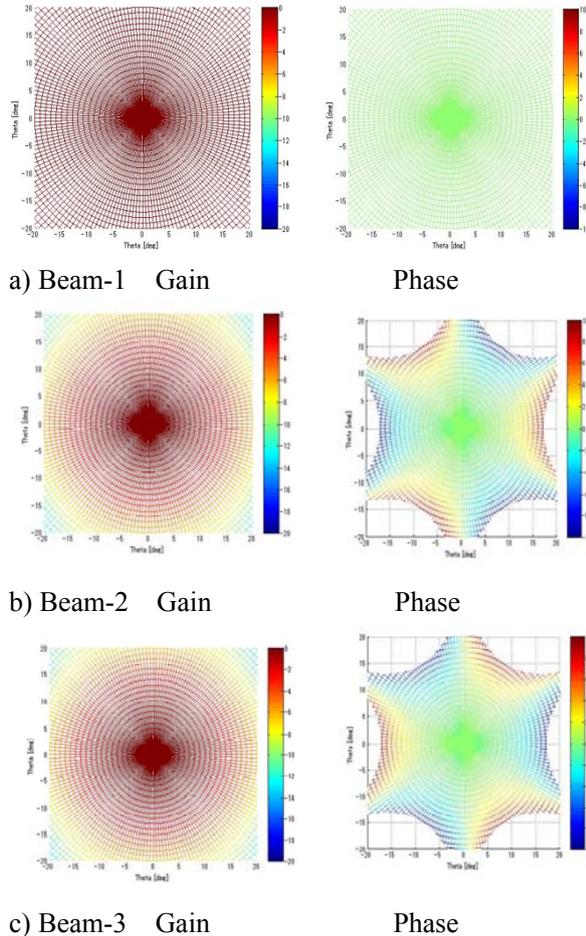


Fig.10 Beam pattern characteristics of seven-element antenna

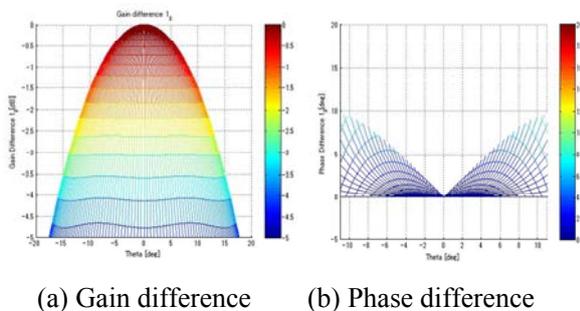


Fig.11 Gain and phase difference among three beams for seven-element antenna

7 まとめ

本報告では、9素子構成である3ビーム空間重畳合成アンテナにおいて、ステアリング時の空間重畳可能範囲を明らかにするとともに、新たに固定ビーム用7素子構成アンテナを検討した。

その結果、9素子構成において、サービスエリア半径 3.2×10^3 kmにおいて、振幅誤差0.1 [dB]、位相誤差1 [deg]を実現でき、指向角度を 3° 振った場合には、サービスエリア半径 1.6×10^3 kmで振幅誤差0.1 [dB]、位相誤差0.6 [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。

7素子構成アンテナにおいて、サービスエリア半径 1.6×10^3 kmで振幅誤差0.1 [dB]、位相誤差0.5 [deg]を実現した。7素子構成は9素子構成に比べ小型化が可能であり、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。

両構成共に振幅・位相誤差が非常に小さく、十分なサービスエリアの確保を実現した。

今後は、アンテナ素子の振幅の重み付けの効果、多重リング状によるサイドローブの低減を検討していく。

[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, 信学会サイエティ大, 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, 信学会サイエティ大, 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.