

HF 帯を用いた広域マルチホップネットワークに関する研究 A Study on Wide Area Multi-Hop Network Employing HF Band

那須有希子[†], 村松宏昭[†], 嶋本 薫[†]

Yukiko NASU, Hiroaki MURAMATSU and Shigeru SHIMAMOTO

あらまし

大規模な災害時等において、既存の通信インフラに障害が生じ広い範囲で通信が不可能となると様々な混乱をまねく恐れがあり、更なる二次災害を防ぐためにも被害エリア間の情報交換が必須である。筆者らは、このような状況に備えて、被害エリアで即時的にアンテナを設置することでネットワークを構築できる広域マルチホップネットワークを提案する[1][2][3]。本提案システムは、まず短波帯においてフェーズドアレーアンテナの指向性を制御し電離層反射波の通信距離を操作することで、広域な無線ネットワーク構築を可能とし、短波帯電波伝搬の問題であるスキップゾーンの範囲を縮小する。更に、マルチホップネットワークを用いて各基地局が中継を行うことで、スキップゾーンをカバーし補完する。

本論文では、フェーズドアレーアンテナを用いた際の短波帯信号の受信電力特性を実験により示す。更にマルチホップを用いて全基地局に的確にパケットを送信するモデルを構築するため、短波帯の実験結果をもとに提案モデルを計算機シミュレーションにより評価する。また、マルチホップの問題点であるフラディングによるパケット衝突増加を軽減するために、パケットの送信タイミングを制御する送信タイミング選択方式を提案し、制御しない場合との比較評価を行う。

1 はじめに

現在、総務省では重要通信を確保するため、国や、有線・無線電気通信事業者及び産業界が連携して効率的な通信システムの開発を検討している。また、通信衛星を利用した地域衛星通信ネットワークも整備されている[7]。

しかし、阪神・淡路大震災において、電気通信設備の被害として、交換設備の停止、基地局の障害、専用線の切断、中継伝送路への障害、電話の輻輳など、かつてない規模での通信障害が発生し、既存の通信形態が使用不可能となった。また、新潟中越沖地震では実際に100近くの基地局が倒壊及び停電によって使用不可能となった。予備の蓄電池で動作していた基地局周辺の携帯電話が使用可能な地域でも通話規制が行われるなど、通話やメールが極端に繋がりにくい状況に

陥った。全世界に目を向ければスマトラ沖地震や、アメリカではサイクロンによる災害や洪水被害など、世界中でも災害により既存の通信インフラが通信不可能となる可能性が考えられる。

そこで本論文では、このような大規模な災害の影響により既存の通信インフラが使用不可能になった際に、それに代わり簡易で即座に構築可能な通信システムとして広域マルチホップネットワークを提案する。本提案モデルを用いれば、被害エリアにおける状況把握、情報提供の連絡手段確保が可能になり、災害直後の救助要請を行うなどの被害エリア間通信、更には被害エリア外通信も行うことができる。都市はもとより、離島や山間部など、世界中のあらゆる状況においても有効な通信手段となると考えられる。本研究は短波帯の性質である電離層反射波を効果的に用いることでより広域通信を可能とし通信の拡張性を高める。

短波帯の電波は、ある一定の条件を満たせば、地球の上空にある電離層で電子密度の違いから屈折して再び地上に戻ってくる特徴があり、数千 km も離れた地点まで電波が到達するため、長距離無線通信に利用される。これにより基地局などの中継局の設置数を少なくすることもできる。同時に、短波を用いれば低電力かつ低コストのシステムを構築できる。ただし、電離層の状態は、昼夜や天候、太陽黒点周期などの太陽系の活動や地球上における磁気変化の影響により複雑に変化するため、短波帯の通信特性は一定とは限らない。また、広域通信は電波の届かないエリアの存在が問題として考えられ、地上波の最大到達距離から電離層反射波の最短通信距離の間に電波の届かないスキップゾーンが生じる問題も挙げられる。

本提案モデルでは、これらの問題解決を図るために、まずアンテナに給電する電流の位相を変化させることで、電波の仰角を制御することのできるフェーズドアレーアンテナを適用する。フェーズドアレーアンテナを用いれば、電波の送受信時に高利得を得ることができ、電離層反射波の通信距離を変動させることができる。フェーズドアレーアンテナの仰角制御を行えばスキップゾーンは縮小し電離層の変化に対応可能となるが、完全にスキップゾーンをなくすことは困難である。

現在、マルチホップを利用した緊急時の通信につい

[†] 早稲田大学大学院国際情報通信研究科

て様々な研究がなされている[14][15]。そこで、各局に中継の機能をもたせてインフラなどのアクセスポイントを経さずに局のみでパケットを中継し即座にネットワークを構築するマルチホップ通信を導入し、スキップゾーンにいる局へはマルチホップ通信を行い、スキップゾーンの補完を図る。

本論文では、まずフェーズドアレーアンテナの仰角を変化させた場合における7MHz帯、14MHz帯の電波の伝搬特性を実験により評価する。次に、実験の結果を基に緊急時に配置される全ての局にパケットを送信するシステムを計算機シミュレーションにより評価する。更に、マルチホップ特有の、パケットを受信した局は直ちにパケットを転送するフラディングによるパケット衝突増加を回避するために、直ちにパケットを転送するのではなく、パケット受信電力を基に転送するタイミングを制御するモデルを送信タイミング選択方式として提案する。そしてシミュレーションで比較することで問題の改善を示す。

本論文の構成は以下のようになっている。まず2章で短波帯の電波伝搬特性を紹介し、3章で短波帯アレーアンテナの特性計測実験結果を示し、4章では広域マルチホップネットワークの紹介とシミュレーションによる評価結果を示し、新たな送信タイミング選択モデルを紹介し、5章では提案モデルと改善モデルとを計算機シミュレーションにより比較評価し、6章で結論とする。

2 短波帯の電波伝搬特性

電波は大きく地上波、電離層反射波などに分けられる。地上波は、送信アンテナから直接伝わる直接波、地表面で反射して受信アンテナに到達する大地反射波、大地の湾曲に沿って伝搬する地表波に区分される[9]。電波の性質より電波は距離の2乗に比例して減衰するが、大地反射波や地表波は電波の波長が長いと減衰の程度が小さくなる。電離層反射波とは、ある一定の条件を満たすと上空の電離層に反射して見通し外の遠距離に到達する電波である。電離層反射波はその状態により電波の減衰の程度が異なる[16]。本研究では電離層反射波について実験によるデータを基に通信可能距離を算出する。

2.1 電離層

電離層は、太陽からの放射エネルギーにより地球上空の大気が電離し、電子とイオンに分解されている層のことであり、電子密度の違いによって下から順に図1のようにD層、E層、F1層、F2層と分けられる[16]。電離層の生成は太陽からの放射エネルギーに起因しているため、日変化、季節変化、太陽黒点などの変化に伴い、その状態は時々刻々と変化するため、夜間になるとD層は消滅し、F1層とF2層は合併しF層となる性質がある。本研究では、E層とF層に反射する電離層反射波に重点をおいて検討する。

2.2 臨界周波数と最大使用周波数

ある任意の周波数の電波が地表と垂直方向に送信され電離層で反射して地表に戻ってきていても、一定の周波数以上になると電離層で反射せずに通過してしまう。この限界（最高）の周波数を臨界周波数という。ただし、電波がD層を突き抜けたとしても、その上空にあるE層やF層で反射されることもあるので、各層ごとに臨界周波数は異なる。通常の臨界周波数はE層で3MHz、F層で8MHzとされている。

また電離層に対して角度 θ ($0^\circ < \theta < 90^\circ$)で入射した電波は、臨界周波数よりも高い周波数であっても電離層で反射する性質がある。入射角が浅ければ浅いほど高い周波数でも反射しやすくなる。このように特定の2地点間において電離層反射波で通信できる最大の周波数を最大使用周波数MUFといい、 $MUF = f$ とすると以下の式(1)で表される[5]。

$$f = f_c \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2h}\right)^2} \quad (1)$$

ここで f_c は反射する電離層の臨界周波数、Dは2地点間距離、hは反射点の高さである。

2.3 電離層反射波

短波帯の電波の性質として、図1に示すように短波(HF: 3MHz~30MHz)は電離層のF層に反射して地表との反射を繰り返しながら地球の裏側まで伝わっていく性質がある。中波(MF: 300kHz~3MHz)は電離層のE層に反射し遠距離通信が可能だが、地球の裏側にまで到達することはない。

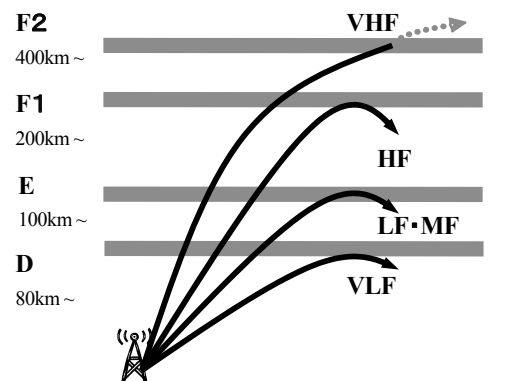


図1 電離層反射

図2は地表にある基地局が短波帯電波を送信した際の地上波と電離層反射波の伝搬経路を表したものである。局Bは送信局、局A、C、Dは受信局である。局Bから仰角 i_a で送信された電波は電離層を突き抜けてしまうが仰角を i_c 、 i_b と低くすることで見かけの電離層は厚くなり反射して戻ってくる。このように仰角を低くすることで電離層反射波の通信距離を伸ばすことが可能となる。電離層反射波の最短到達距離を跳躍距離という[16]。本論文では電離層反射波の最長到

遠距離を最大通信距離と呼ぶ。短波帯通信を行う際の特徴として、スキップゾーンの問題が挙げられる。図2の局Aは局Bからの地上波も届かず、電離層反射波も受信できない。このようなエリアをスキップゾーンという。例えば早朝の5時に7MHzで東京から電波を送信した場合、中部・関西地方や東北地方はスキップゾーンになってしまう。

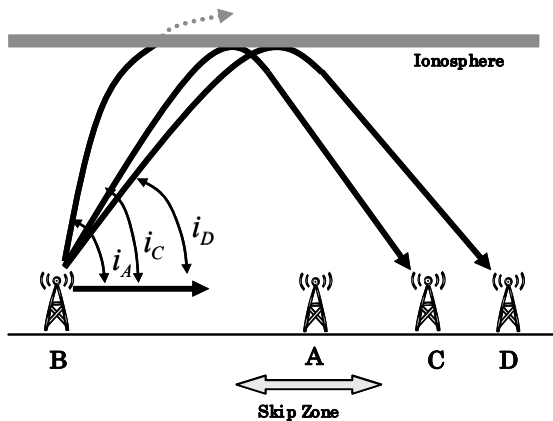


図2 送信仰角変化に伴う伝搬経路と通信距離の変動

本研究では周波数帯域に短波帯を利用し、電離層反射波を有効利用するため短波帯アレーアンテナの指向性を制御したり、気候の変化に応じて利用周波数帯域を変えたりし電波の通信距離を変化させて受信局に的確に情報パケットを送信し、スキップゾーンも補完する通信システムの構築を目指す。

3 短波帯アレーアンテナの特性

同じ特性を持つ複数のアンテナの配列により構成されるアンテナシステムをアレーアンテナという。これは、アンテナの指向性を鋭くして高利得を得ることができる。

3.1 短波帯用アレーアンテナ

図3は本研究の測定実験で使用した短波帯用フェーズドアレーアンテナの簡単な構成を示した図である。直交座標系の原点に半波長ダイポールアンテナ1を置き、原点からZ軸に沿ってdだけ離れたところにアンテナ1と同じ形式の半波長ダイポールアンテナ2をおいた。受信時には両アンテナで別々に受信した電波を加算器Σで合成し出力する[4]。片方のアンテナから加算器へ信号を送る途中に移相器を投入し位相を遅らせてから合成することでアンテナの指向性を変化させる。短波帯通信においてフェーズドアレーアンテナを用い、仰角指向性を変化させることで電離層反射波の通信距離を操作できる。これにより電離層反射波を効果的に利用でき、スキップゾーンが縮小し通信エリアの拡大が図れる。

本研究実験では複数のアンテナ素子とそれに給電する電流の位相を変化させるための移相器でフェーズド

アレーアンテナを作成し、受信電力の測定に使用した。

図4は本実験で使用したアンテナ素子数が2つの場合における、アレーアンテナのブロック図である。

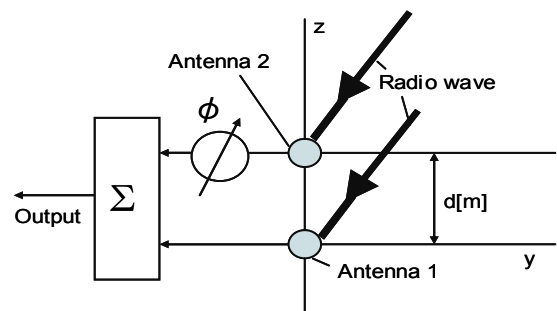


図3 フェーズドアレーアンテナの構成[4]

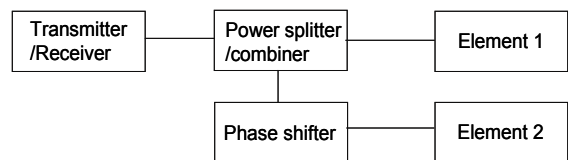


図4 実験システムの構成図

3.2 実験環境

本実験ではアンテナの指向性を変えた各パターンについて電離層反射波の受信電力を計測評価する。図5は実験に使用した受信局のアンテナである。アンテナは東京の西早稲田に設置し、地上高を10m、22mとした2本の半波長ダイポールアンテナによるアレーアンテナを用いた。半波長ダイポールアンテナの仕様は表1に示す。

1本のアンテナで受信する際は地上高16mに設置した半波長ダイポールアンテナを用いた。アレーアンテナでは地上高10mのエレメントに給電する電流の位相を基準値0とし、地上高22mにあるエレメントに給電する電力の位相を移相器で -150° 、 -120° 、 -90° 、 -60° 、 -30° 、 0° と変えて計測した。両アンテナに給電する電流の位相差が少ないとき、アレーアンテナの指向性は低い仰角方向に強く現れ、位相差が大きくなるにつれアンテナの指向性が強く現れ仰角も高くなっていく。フェーズドアレーアンテナを適用した短波帯電波伝搬特性計測実験における各種パラメータを表2に示す。図6は40日間の平均臨界周波数の日周変化をまとめてグラフに



図5 実験用アンテナ

したものである[8]。この図から、本研究で実験を行う時間帯として、臨界周波数が緯度の違いによる変動の差が少なく比較的安定している時間帯を考慮して、7MHz帯は19時から23時までに、14MHz帯は8時から13時までに焦点をおいて実験を行った。この時間帯の電離層高度を求めた結果、7MHzの電離層高度はおよそ200km、14MHzは250kmである[8]。

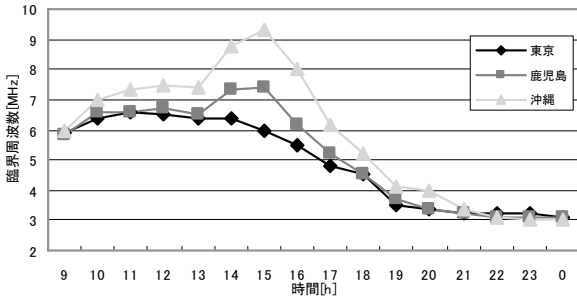


図6 臨界周波数の日周変化

実験の使用周波数は7MHzと14MHzである。2地点間距離は表3、表4に示す各値で行った。このとき伝搬距離と電離層高度による仰角及び電離層入射角の間に以下の式(2)が成り立つ[4]。

$$\sec(i_o) = f_c \sqrt{1 + \left(\frac{D}{2h'}\right)^2} \quad (2)$$

$\sec(i_o) = 1 / \cos(i_o)$, i_o は電離層への電波の入射角, h' は電離層高度, D は2地点間の距離を表している。式(2)と2地点間距離及び電離層高度の値から仰角を算出する。

3.3 実測による性能評価

表5、表6は7MHz、14MHzそれぞれの受信電力値dBmをまとめたものである。上段の度数表示されている数値は2つのエレメントに給電する電力位相差を表している。その下段の数値はアンテナの指向性の強く現れる仰角を表している。指向性を制御することで受信電力値も変化している様子が見られる。図7(a)、(b)は、計測データを基に7MHz、14MHzでアンテナ1本1element、アンテナ2本で位相差なし2element(Same phase)、アンテナ2本で位相差あり2element(Phase control)それぞれの伝搬による減衰特性をグラフにしたものである。図7より、給電位相を操作することで伝搬損失が減少することが分かる。指向性制御による受信電力の改善はエレメント1本使用した時と比較して3.7~10.1dBであった。

表7、表8に、図7の減衰特性を用いて送信局の送信電力を仮定した場合における短波帯信号の電離層反射波の通信距離推定値を示す。跳躍・最長通信距離は、図7の減衰特性の各値にそれぞれの送信電力値を加えて描かれるグラフと、所要電力閾値との交点の値とし

た。7MHz帯、14MHz帯のそれぞれの所要電力閾値はSN比が0より大きくなる値として-79dBm、-92dBmと設定する。受信電力値がこの閾値より大きくなる範囲が電離層反射波での通信可能範囲とする。なお、地上波の通信距離はそれぞれSN比が0より大きくなる値として100km、110kmとした[4]。送信局の送信電力は、災害情報の発信もしくは中継を行うために最低限必要と考えられる規模の設備を想定し、100W、500W、1kW、10kWとした。

7MHz帯で電離層反射波を使用する際、近距離になるにつれ位相を操作することで受信電力が高くなっている様子が分かる。14MHz帯では概ね1000km以下の距離では電波の透過量が多くなってしまいが、これを除いた範囲では7MHz帯の比較結果と同様に近距離になるにつれて位相を操作することで伝搬損失が減少する。

表1 半波長ダイポールアンテナの仕様

周波数	7 MHz, 14MHz
インピーダンス	50Ω
エレメント長	11.6 m

表2 両計測実験モデルにおける各種パラメータ

周波数 [MHz]	7	13~15
2地点間距離 [km]	430~3730	430~6970
アンテナ高 [m]	10, 22 (2本使用) 16 (1本使用時)	
サンプリング数	1000	
サンプリング間隔 [s]	0.1	

表3 7MHzの実験結果

7 MHz	2地点間距離 [km]	送信出力 [kw]	仰角 [deg.]
兵庫	430	0.1	43.4
韓国	1130	250	16.98
中国	1690	150	9.15
ベトナム	3730	100	5.81

表4 14MHzの実験結果

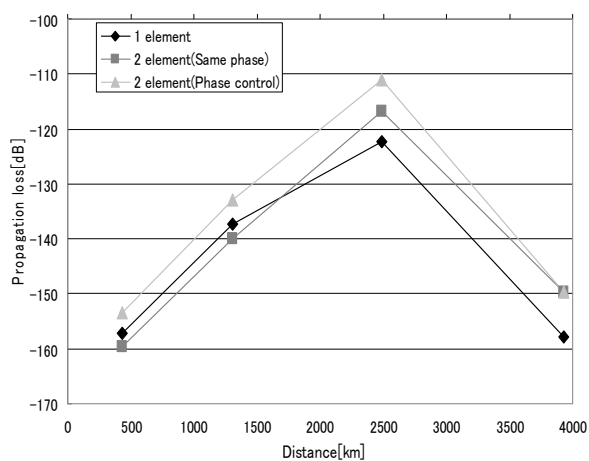
14MHz	2地点間距離 [km]	送信出力 [kw]	仰角 [deg.]
兵庫	430	0.1	49.77
韓国	1130	250	20.89
グアム	2530	100	10.94
タイ	4590	250	6.62
インド	6970	500	4.11

表5 位相変調度数あたりの受信電力値（7MHz）

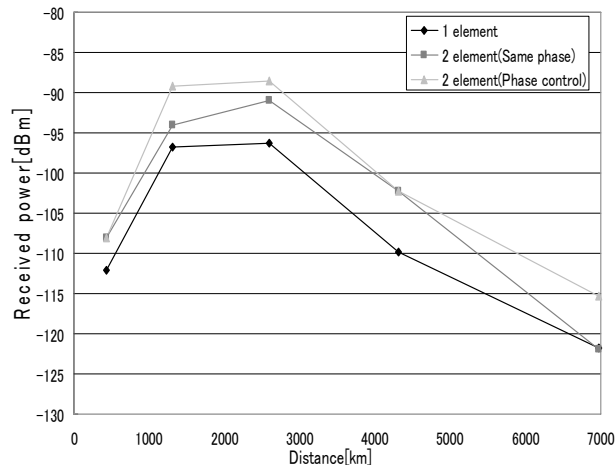
位相差	1 element	0°	-30°	-60°	-90°	-120°	-150°
		16.3°	17.3°	19°	23°	34°	39°
兵庫	-106.2	-108.6	-106.5	-104.8	-104.8	-102.5	-108.6
韓国	-54.4	-56.9	-56	-58.8	-55.2	-51.8	-50
中国	-40.4	-34.9	-38.7	-39.2	-35.7	-29.4	-29.3
ベトナム	-77.9	-69.7	-74.3	-74	-78	-75.3	-77.1

表6 位相変調度数あたりの受信電力値（14MHz）

位相差	1 element	0°	-30°	-60°	-90°	-120°	-150°
		19.2°	20.4°	23.2°	36.7°	41.5°	44.3°
兵庫	-115.1	-111.1	-111.6	-111.5	-111.7	-112.4	-113.4
韓国	-63.7	-60	-60.5	-62.6	-62.6	-59.6	-55.2
グアム	-66.3	-60.9	-58.6	-59.6	-61.8	-60.8	-61.1
タイ	-75.9	-68.3	-68.6	-68.2	-70.2	-68.5	-69.4
インド	-84.8	-85	-79.9	-83.4	-83	-78.3	-81.1



(a)7MHz



(b)14MHz

図7 アレーアンテナによる電離層反射波の伝搬特性比較

表7 各出力送信時の電離層反射波の到達距離変動（7MHz）

	跳躍距離 [km]			最長通信距離 [km]		
	1 element	2 elements (same phase)	2 elements (phase control)	1 element	2 elements (same phase)	2 elements (phase control)
100W	1970	1860	1520	2760	3020	3150
500W	1410	1500	1180	3050	3330	3420
1 kW	1240	1350	1050	3170	3470	3530
10kW	790	900	610	3580	3900	3900

表8 各出力送信時の電離層反射波の到達距離変動（14MHz）

	跳躍距離 [km]			最長通信距離 [km]		
	1 element	2 elements (same phase)	2 elements (phase control)	1 element	2 elements (same phase)	2 elements (phase control)
500W	1180	1000	850	2930	3810	3900
1 kW	1010	820	710	3310	4260	4280

4 広域マルチホップネットワーク

短波帯電波伝搬の特徴であるスキップゾーンの問題を解決するため、適宜フェーズドアレーアンテナの指向性を変化させることで、スキップゾーンが縮小し、電波の到達範囲が拡大されることがわかった。しかし、完全にスキップゾーンをなくすことは困難であると考えられる。そこで、マルチホップを適用した広域マルチホップネットワークを提案する。ノード（基地局）に中継の機能を付加しノードが中継を行うことでマルチホップ通信を可能とする[6][10]。

4.1 提案モデル

図8の送信局Aが情報パケットを送信した場合、地上波と電離層反射波が届く色のついたエリアの間に、パケットの届かないドーナツ状のスキップゾーンと呼ばれるエリアが存在する。局B、Dは局Aのスキップゾーンにあるため局Aからのパケットを受信することはできない。しかし、局Aからの信号を受信した局Cがマルチホップ通信で局Aからのパケットを中継することで局B、局Dともパケットを受信することが可能となる。図8は局Cがパケットを中継する状態を表している。

このように短波帯電波伝搬特性である電離層反射波とマルチホップの利点を生かし、アレーアンテナの位相制御とを融合させたモデルを広域マルチホップネットワークとして考察する。

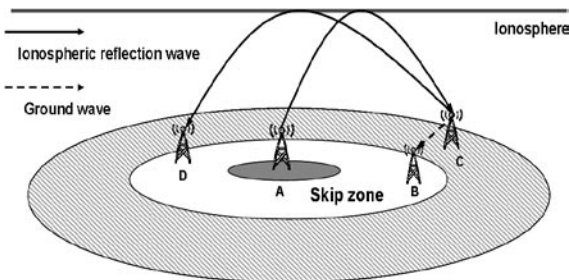


図8 提案モデルの簡略構成図

4.2 カバー率の推定

3章での実験結果をもとに、フェーズドアレーアンテナを用いる複数の局を配置した提案モデルの評価を計算機シミュレーションにより行う。マルチホップを適用することでスキップゾーンのエリア縮小を実現させるための指標として、シミュレーションエリアに存在する複数の局に対して、ある局から送信される情報パケットがマルチホップ中継されることで到達する局の割合をカバー率として算出する。提案モデルを正常に稼働させるために必要なネットワークスケールやマルチホップ中継局数について検討する。

前提としてシミュレーションフィールドは正方形で幅を100km～3000kmと広げる。局数は100局、周波

数14MHz、hop数を0hop～3hopとした。図9はアンテナ数1本、送信電力10kWとしてシミュレーションフィールドを広げた際のカバー率を求めたグラフであり横軸はシミュレーションフィールド幅である。ここで、hop数は中継局の最大局数と定義する。グラフより、ある一定の局密度においてカバー率が悪化してしまうことがわかる。これはスキップゾーンにある局の数が増えたことが原因だと推測される。図10はアンテナ数2本（位相差なし）、送信電力500Wとした場合、図11はアンテナ数2本（位相差あり）、送信電力500Wとした場合のカバー率のグラフである。周波数や送信電力を操作することでカバー率の悪化を抑えることができることがわかる。特に図11のアンテナ仰角指向性を変化させた場合においてはhop数を増やすことでカバー率が向上し、スキップゾーンが縮小することが示された。

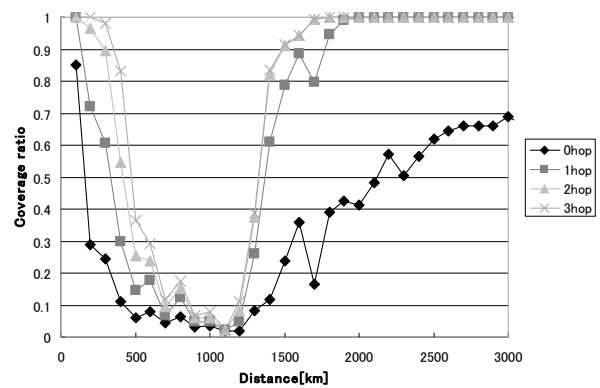


図9 カバー率
周波数：14MHz、アンテナ：1 element
送信電力：10kW

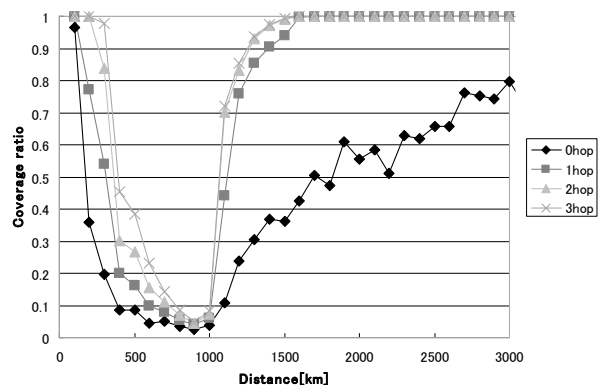


図10 カバー率
周波数：14MHz、アンテナ：2 elements (same phase)
送信電力：500W

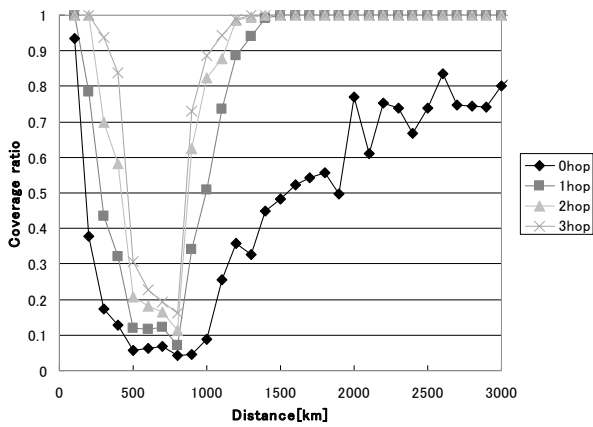


図11 カバー率

周波数：14MHz, アンテナ：2 elements (phase control)
送信電力：500W

4.3 受信電力に基づく送信タイミング選択方式の導入

パケットをマルチホップで送信する際、フラッディングすることでパケット衝突が頻繁に生じる問題が発生してしまう[12][13]。そこで中継局がパケットを受信した際に受信電力に基づいて、パケット転送タイミングを選択するモデルを送信タイミング選択方式として提案し、提案モデルに導入することで、より効率的なネットワーク構築を実現する。

従来のマルチホップはパケットを受信した際、即座に転送モードに入り、任意の ShiftSlot 以内でランダム値を決定し、このランダム値後にパケットを転送する[10][11]。提案する送信タイミング選択方式は、即座に転送モードに入らずに、パケット受信電力に応じて転送モードに入るタイミングを TimeShiftSlot だけ遅らせることで、パケットの頻繁な衝突回避を図る。

図12に示すように、送信局 S 局がパケットを送信する場合、短波の地上波と電離層反射波とが届く色のついたエリアにおいて、パケットを受信する電力は異なるので、受信電力値の範囲ごとに3つのエリアグループに分類する。太い斜線のエリアは受信電力が大きいグループであり、細い斜線エリア、薄い色のエリアの順に受信電力が低いエリアグループとなる。このように受信電力の値を基にエリアを区分し、受信電力が小さいエリアから level 値を 0, 1, 2 と設定し、level に応じてフラッディングの転送モードに入るタイミングを TimeShiftSlot だけ遅らせる。TimeShiftSlot を求める式を以下のように定義する。

$$\text{TimeShiftSlot} = \text{ShiftSlot} \times \text{level}$$

具体的には、図12において局 D は局 S からのパケットを受信すると受信電力から level が 2 のエリアにいると判断し level = 2 に設定する。そして ShiftSlot = 10slot であれば、TimeShiftSlot は 20slot となり、20slot 後に転送モードに入る。転送モードに入ると従来同様に ShiftSlot 以内にランダム値を決定しパケットの転送を行う。

このように、転送タイミングを受信電力値のレベルに応じて変化させることでパケット衝突が回避され、スキップゾーンや遠距離にある局にも即座にパケットを送信することが可能となると考えられる。

以上のモデルを計算機シミュレーションにより性能評価する。

5 シミュレーション結果

送信タイミング選択方式を適用した新たな提案モデルを比較のためにタイミングシフトモデルとして、従来のマルチホップモデルをランダムモデルとして呼び、これらの性能を比較評価する。

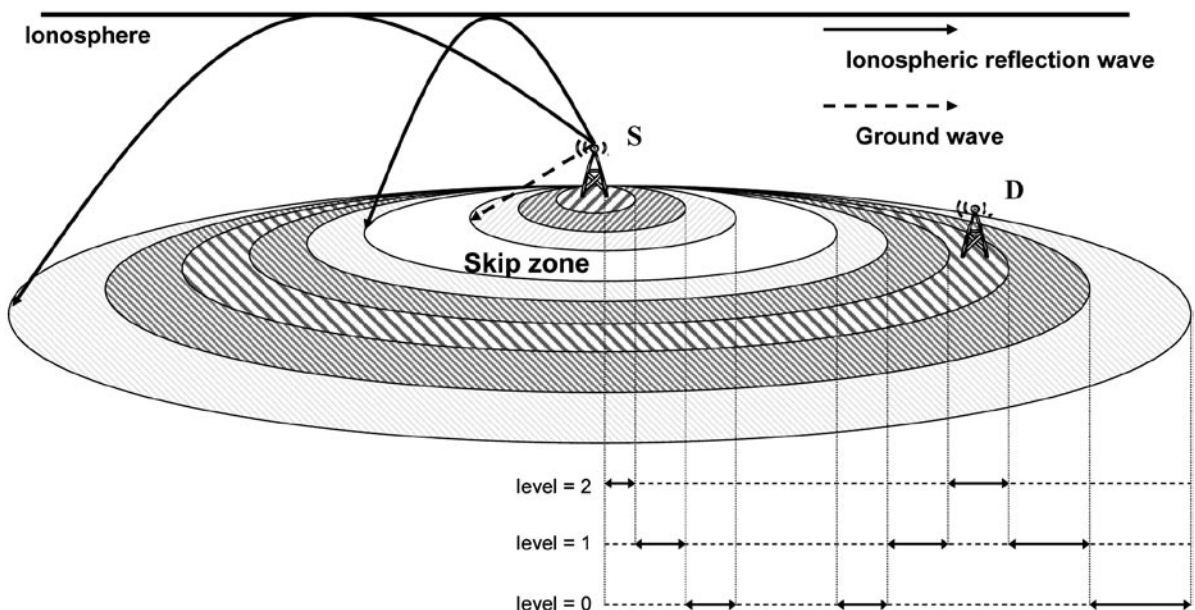


図12 送信タイミング選択方式

5.1 シミュレーション諸元

計算機シミュレーションの各種パラメータを表9に示す。2本のアンテナに給電する電流の位相差は電離層反射波の跳躍距離において最も大きな特性の改善がみられた -150° で行った。S/N比は伝搬損を基に送信出力値500Wを想定した際に受信すると推定される電力値と内部雑音と都市における外部雑音の合計値から算出した。またパケットのIntervalSlotとはパケットが送信されてから転送され続ける期限の最大Slot値である。

表9 シミュレーションパラメータ

パケット発生率	0.0001
局数	100, 300
シミュレーションフィールド幅 [km]	10000
情報パケットのInterval slot	250
Shift slot	50
S/N比 [dB]	level = 0 : 0~20 level = 1 : 20~30 level = 2 : 30以上
位相差 [deg.]	-150

5.2 シミュレーション結果

図13はパケット衝突率をhop数ごとに比較したものである。パケット衝突率とは送信・転送された全パケット数あたりの衝突して受信されなかったパケット数の割合である。ランダムモデルに比べて送信タイミングシフトモデルのほうがパケット衝突が最大で約0.2減少することがわかる。

図14は両モデルのhop数とスロット成功率の関係を比較したグラフである。スロット成功率とは送受信に使用されたスロットあたりのパケット衝突が生じなかったスロットの割合を表す。パケット発生率を0.0001として、▲がランダムモデル、×がタイミングシフトモデルで、実線がnode数100局、点線がnode

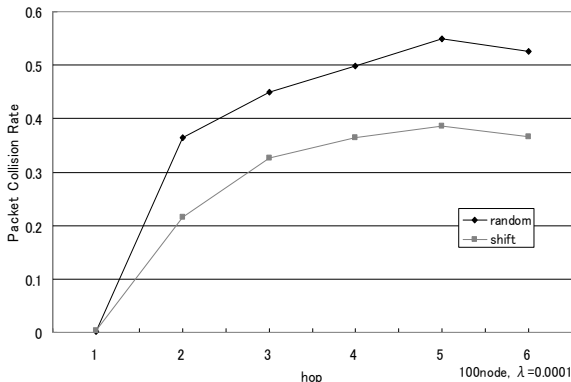


図13 パケット衝突率

局数：100node, パケット発生率：0.0001
送信電力：500W

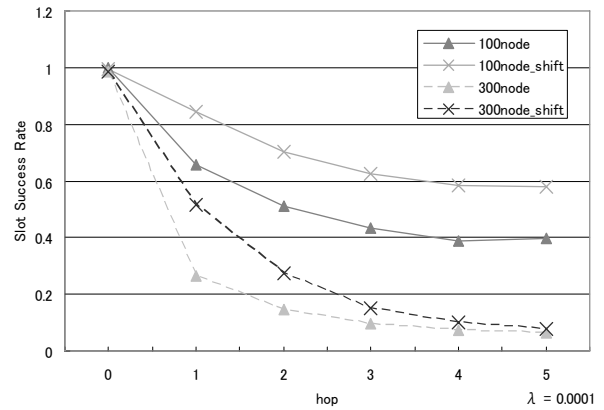


図14 スロット成功率

局数：100,300node, パケット発生率：0.0001
送信電力：500W

数300局の結果である。100局では1hop~5hopで中継を行う際、いずれのhop数でもスロット成功率が向上することがわかる。300局では1hopで改善度が最大になるが、その後はhop数の増加と共に改善幅は少なくなっている。これはネットワーク内のトラフィック量が増えすぎてしまったためタイミングシフトモデルによるパケット衝突回避の効果が薄れてくるからだと考えられる。

6 結論

本論文では、まず短波帯通信においてフェーズドアレーアンテナを用いることで仰角を操作し、受信電力を測定する実験を行った。結果、7MHz帯においてフェーズドアレーアンテナの仰角を操作することで同相のアンテナ2本を使用した場合に比べ受信電力値が最大で6.9dBm、アンテナ1本を使用した場合に比べ最大で10.1dB改善できることを確認した。14MHz帯においてはフェーズドアレーアンテナを使用することで同相のアンテナ2本を使用する場合に比べ受信電力値が最大で6.7dBm、アンテナ1本を使用した場合に比べ最大で8.5dB改善できることを確認した。

また、これらの実験結果を基に行ったシミュレーションではスキップゾーンの影響で信号を受信できない局があっても、マルチホップを用いればカバーできることが示された。スキップゾーン問題によるカバー率の悪化は使用するアンテナによって異なるが、仰角を操作することで電離層反射波の通信距離を広くできれば、カバー率を改善することができる。同時に、hop数を増やすこともカバー率向上に効果的であることも明らかとなった。

しかしマルチホップを適用するとフラッディングによるパケット衝突が頻繁に生じてしまう。この問題を改善するために送信タイミング選択方式を提案した。新たな提案モデルであるタイミングシフトモデルをランダムモデルと比較評価した。結果、パケットの衝突率が改善できることがわかった。またスロット成功率

の悪化も低 hop では改善することがわかったが、hop 数が増えるとトラフィックが増えてしまうことでスロット成功率が悪化してしまうこともわかった。

今後の課題として、スキップゾーンに局が多くあるとカバー率が低下してしまうという結果を考慮し、局密度の視点からスキップゾーンにおけるパケット到達率の向上を実現するための局配置ルールを検討する。また本研究の結果をもとに、パケットフラディングによる高トラフィック時においても性能の劣らない通信モデルやルーティング方法・中継局の選択方法などを検討する。

参考文献

- [1] 村松宏昭, 那須有希子, 嶋本薫, “アンテナ仰角制御を用いた短波帯広域無線ネットワークに関する研究,” 電子情報通信学会信学技報, ISSN 0913-5685, pp. 65-70, Jan. 2008.
- [2] 白錦淑, A.M. Alshehab, 那須有希子, 嶋本薫, “HF 帯を用いたマルチホップ網に関する研究,” 日本シミュレーション学会, Nov. 2004.
- [3] H.K. Rouf and S. Shimamoto, “Studies on multihop high frequency communication systems,” 電子情報通信学会総合大会, BS-8-13, Mar. 2006.
- [4] 谷口慶治, アンテナと電波伝搬, 共立出版, 2006.
- [5] 虫明康人, アンテナ・電波伝搬, コロナ社, 1961.
- [6] C-K.Toh, アドホックモバイルワイヤレスネットワーク, 共立出版, 2004.
- [7] <http://www8.cao.go.jp/cstp/>
- [8] <http://wdc.nict.go.jp/>
- [9] 電気通信振興会, アンテナおよび電波の伝わり方, 1997.
- [10] IETF MANET Working Group, <http://tools.ietf.org/wg/manet/>
- [11] J. Macker, “Simplified Multicast Forwarding for MANET,” IETF MANET Working Group. <http://www.ietf.org/internet-drafts/draft-ietf-manet-smf-06.txt>
- [12] A. Svenson and M. Rydstrom, “A communication network for safe traffic and efficient transportation,” Proc, 11th Wireless World Research Forum Work-shop, Oslo, Norway, June 2004.
- [13] C. E. Perking, E.M. Belding-Royer and S.R. Des, “Ad hoc on demand distance vector (AODV) routing,” IETF Internet Draft, <http://www.ietf.org/rfc/rfc3561.txt>
- [14] 藤原孝洋, 飯田登, 渡辺尚, “アドホックネットワークを併用する緊急通信無線網のアクセス方式,” 信学論(B) vol.J86-B, no,11, pp2345-2356, Nov. 2003.
- [15] 織田将人, 上原秀幸, 横山光雄, 伊藤大雄, “端末のパケット中継機能を用いた安否確認ネットワークの検討,” 信学論(B) vol.J85-B, no.12, pp2037-2044, Dec. 2002.
- [16] 電子通信学会, アンテナ工学ハンドブック, オーム社, 1980.