

21. VDL モード 2 と VHF ACARS の通信性能比較

通信・航法・監視領域 ※北折 潤

1 はじめに

世界的に普及している航空用 VHF データリンクシステムに VDL モード 2 (VHF Digital Link, 以下 VDL2 と略す) および VHF ACARS (Aircraft Communications Addressing and Reporting System) がある。VDL2 と VHF ACARS は共に CSMA (Carrier Sense Multiple Access) 方式を基本としたシステムであり共通点も多い。VHF データリンク通信の需要は増加傾向にあることから、通信システム上処理可能な限界点等を明らかにし、今後の運用に対しての何らかの運用指針を与える必要がある。両システムとも実運用中であることから、システム処理に過大な負荷をかけるような運用条件での性能測定は極めて困難である。このため処理限界や両者の通信性能差等についての比較結果はほとんど得られていなかった。

電子航法研究所は VDL2 と VHF ACARS の両データリンクについて計算機シミュレーションモデルを製作した。本稿では計算機シミュレーションモデルを用いた多数機環境下における VDL2 および VHF ACARS の通信性能評価結果について述べる。

2 VHF ACARS および VDL2 の概要

2.1 VHF ACARS

VHF ACARS は、ARINC が開発した最も初期のデータリンクシステムである。VHF ACARS は変調方式が AM-MSK (Amplitude Modulation — Minimum Shift Keying), アクセス方式が non persistent CSMA のシステムであり、チャンネル間隔 25kHz, 伝送速度 2400bps のキャラクタ指向型パケット通信である [1]。Non persistent CSMA では、通信路状況を監視し送信可能ならば送信し、送信不可ならば設定時間だけ待って再び通信路監視から始める。VHF ACARS には符号による前方誤り訂正機能はない。

単に ACARS と言った場合、狭義には VHF ACARS システムを指すが、広義には様々なデータリンク上で通信可能な共通のプロトコル名を意味する (ACARS プロトコル)。

世界的には ARINC の他, SITA やアビコムジャパン等のサービスプロバイダが VHF ACARS を運用している。各サービスプロバイダ間では ACARS プロトコルの互換性が確保されている。しかし VHF ACARS は国際民間航空機関での標準規格には制定されていない。

2.2 VDL2

VHF ACARS よりも高性能な VHF 帯データリンクとして国際民間航空機関が標準規格化したものを総称して VDL と呼ぶ。現在, VDL にはモードの異なる 3 種類の規格 (モード 2, モード 3, モード 4) が存在するが, 各モード間の互換性はない [2]。

VDL2 は変調方式が D8PSK (Differential 8 Phase Shift Keying), アクセス方式が p -persistent CSMA のシステムであり, チャンネル間隔 25kHz, 伝送速度 31500bps のビット指向型パケット通信である [3]。 p -persistent CSMA では, 通信路状況を監視し送信不可の場合には引き続き送信可能になるまで通信路状況を観察し続け, チャンネルが送信可能となった場合には確率 p でフレームの送信を開始する。VDL2 は Reed-Solomon(255, 249) 符号による前方誤り訂正機能を備えている。

VDL2 は AOA (ACARS over Aviation VHF Link Control) によって ACARS プロトコルを扱えることから, VHF ACARS の後継通信システムとして普及が進んできている。また, VDL2 は ATN (Aeronautical Telecommunications Network) のデータリンクとして使用することができる。

VHF ACARS と VDL2 の主要諸元比較表を表 1 に示す。

3 シミュレーション条件

3.1 通信メッセージ長と発生間隔分布

実際の VHF ACARS の通信記録 (2006 年 8 月 ~ 10 月分) を用いて, VHF ACARS の通信メッセージ長および発生間隔の分布を調査した [4]。

VHF ACARS では定型的表現による短いメッセージが多く, 660 バイトを超える長いものは非

表1 VHF ACARS と VDL2 主要諸元比較表

データリンク	VHF ACARS	VDL2
チャンネル間隔	25kHz	25kHz
電波形式	A2D	G1D
変調方式	AM-MSK	D8PSK
伝送速度	2400bps	31500bps
伝送情報単位	キャラクタ	ビット
誤り訂正機能	なし	あり
アクセス方式	Non persistent CSMA	<i>p</i> -persistent CSMA
対応情報	データ	データ
メッセージフレームサイズ	220 バイト	220 バイト
対応プロトコル	ACARS	ACARS, ATN

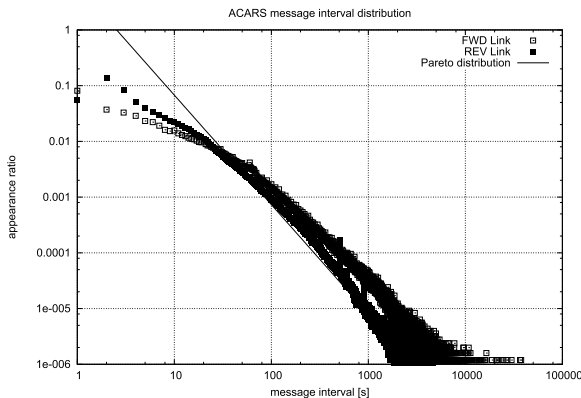


図1 ACARS 発生間隔分布

常に少なかった。660 バイト以下のメッセージ長分布では特徴ある規則性はなかったため、通信メッセージ長は 1~660 バイトまでの一様分布と仮定した。

VHF ACARS のフォワードリンク (DSP : サービスプロバイダ局 → AIR : 航空機局) およびリバースリンク (AIR → DSP) のメッセージ発生間隔の出現頻度を図 1 に示す [4]。本稿では、発生間隔はあるメッセージの発生時刻から次のメッセージの発生時刻までと定義する。発生間隔が 10[s] 以下ではやや平坦に近いが、グラフ右側ではほぼ直線状となりべき分布の兆候が現れている。なお両リンクとも DSP での記録であるために、リバースリンクの発生間隔分布は厳密にはメッセージ発生時刻の差になっていない。しかしグラフ概形からフォワードリンクと同様の性質を持っていると推測される。

発生間隔が 10[s] 以上の範囲をパレート分布

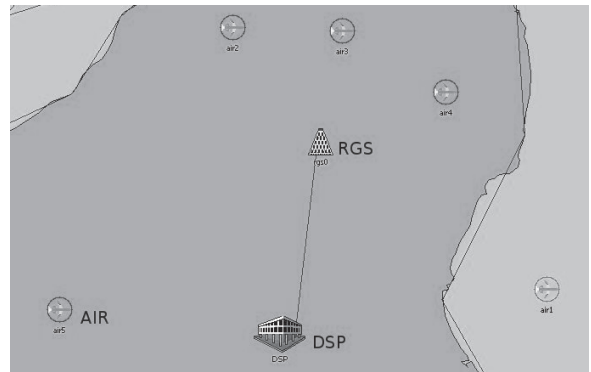


図2 シミュレータ構成概観

(付録 A) で近似する場合、パラメータ c は 1.0 程度となった。本シミュレーションでは「発生間隔が 10[s] 以上」のような制限が設けられないことや、 $c = 1.0$ とすると理論上のパレート分布での期待値が求められないこと等を考慮して、発生間隔分布は $c = 1.1$ のパレート分布と仮定した。

通信メッセージ長および発生間隔分布はデータリンクに関係なく、通信当事者のメッセージ発生機構を表しているとみなせるため、VHF ACARS, VDL2 とともに、通信メッセージ長は 1~660 バイトまでの一様分布、発生間隔分布は $c = 1.1$ のパレート分布と仮定した (表 2)。

3.2 シミュレータとネットワーク構成

Microsoft Windows XP Professional 上にプロトコルシミュレータ OPNET (version 11.5A) を導入し、OPNET 上で VDL2 モデルおよび VHF ACARS モデルを実装した。なお比較を容易にするために両モデルとも ACARS プロトコルをシミュレーション対象とした。

本シミュレータにおけるネットワークの構成は、両モデルとも DSP, RGS (地上無線送受信局), AIR の各ノードで構成されている (図 2)。地上には 1 つの DSP に対して RGS を複数配置できるが、本稿では RGS 数も 1 つの場合の結果について報告する。シミュレータでの主な設定パラメータを表 2 に示す。AIR 側と DSP 側のメッセージ発生間隔分布のパラメータ a と g は 4 節では $a = g$ としてシミュレーションを行った。これは現実よりも厳しい条件下での通信性能限界を求めるための設定として選択したものである。

表2 シミュレーション主要設定パラメータ

シミュレーションパラメータ	設定値	備考
AIR 数	10~200	10 機刻み
RGS 数	1, 2, 3	
RGS タイプ	independent coordinate	DSP から各 RGS へ同時にスキッタ送出 DSP から各 RGS へ指定順にスキッタ送出
シミュレーション時間	20000 [s]	
RGS-DSP 間遅延時間	1 [s]	
AIR メッセージ長分布	uniform(1, 660)	1~660 バイトの範囲の一様分布に従う
AIR メッセージ発生間隔分布	pareto(a, 1.1)	確率密度関数 ca^c/x^{c+1} ($c=1.1$) のパレート分布に従う
DSP メッセージ長分布	uniform(1, 660)	1~660 バイトの範囲の一様分布に従う
DSP メッセージ発生間隔分布	pareto(g, 1.1)	確率密度関数 cg^c/x^{c+1} ($c=1.1$) のパレート分布に従う

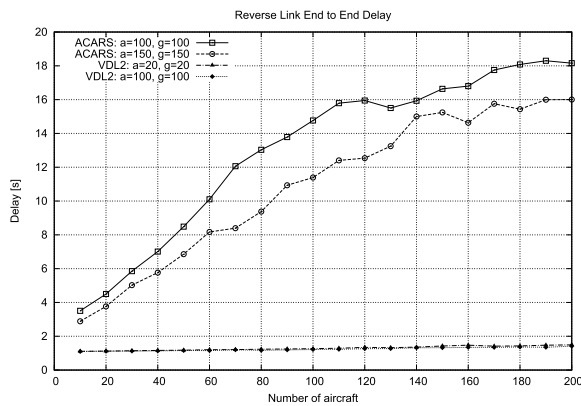


図3 リバースリンク伝送遅延時間

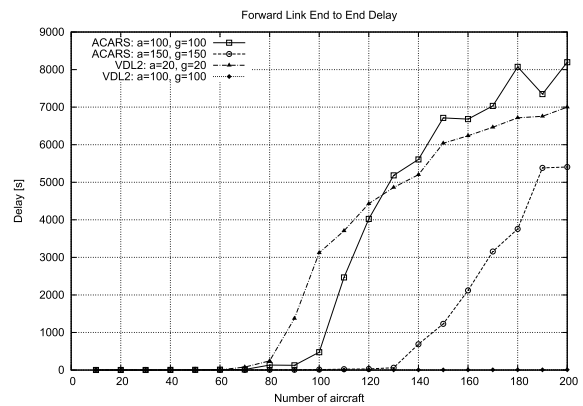


図4 フォワードリンク伝送遅延時間

4 シミュレーション結果

4.1 伝送遅延特性

リバースリンク平均遅延時間を図3に示す。VHF ACARSはAIR局数 $\#AIR$ が多いほど遅延が大きくなる傾向にあるが高々20[s]程度以内であり、VDL2は2[s]以下のほぼ横ばいであった。リバースリンク方向では各AIRが独立に送信待ち行列を持っており発生間隔の期待値も $a=20$ で220[s]になることから、各AIRの発生するメッセージ数が少なく送信処理待ち時間がほとんどないことがわかった。

一方、フォワードリンク遅延時間(図4)では、リバースリンクに比べてVHF ACARS、VDL2とも非常に大きな遅延が発生していた。しかしDSPで発生したメッセージが、RGS到達後からAIRまで要する遅延時間は長くとも70[s]程度となった。これは、RGS→AIR間にボトルネックはなく過大な遅延時間の大部分がDSP→RGS間で発生していることを示している。

DSP-RGS間の回線遅延は1.0[s]と設定しているため、遅延時間のほとんどはDSP内部での待ち時間である。つまりフォワードリンクのメッセージ発生源であるDSPは1局しかないので、多数ある各AIRへの送信メッセージやACK(Acknowledge: 肯定応答)が全てDSP内の1本の送信待ち行列に蓄積されることを意味する。例えば $g=100$, $\#AIR=200$ の場合、各AIR当たりの発生間隔の期待値は1100[s]だが、DSP全体としてのメッセージ平均発生間隔に換算すると $1100/200=5.5$ [s]程度に見積もられる。すなわち過大な遅延時間の発生原因は、DSP送信待ち行列内での送信処理待ち時間の累積によるものである。

ここで、各シミュレーションのフォワードリンク平均遅延時間がある閾値未満となる最大の航空機数 $\#AIR_{max}$ とメッセージ送信間隔分布パラメータ g を用いて、各ネットワークで許容できる限界の平均発生間隔 T_c を以下の式で定義する

表3 遅延時間による限界平均発生間隔評価

データリンク	g	$\#AIR_{max}$	$T_c[s]$
VHF ACARS	200.0	170	12.9
	150.0	130	12.7
	100.0	70	15.7
VDL2	20.0	60	3.67
	10.0	30	3.67
	7.62	30	2.79
	5.0	20	2.75

(付録A式(3))。

$$T_c = \frac{cg}{c-1} \frac{1}{\#AIR_{max}} \quad (1)$$

この式を用いて、各限界平均発生間隔を求めた(表3)。なお閾値には、VHF ACARSにはタイムVGT2の設定値80[s]、VDL2にはタイム $T1_{max}$ の設定可能な最大値20[s]を使用した。これらのタイムは、メッセージ再送処理に入るまでの待ち時間に相当する。

つまり、定常的な運用を仮定した際にネットワーク全体で許容できる平均発生間隔はVHF ACARSで12.7[s]以上、VDL2で2.75[s]以上が適切と考えられる。逆に言うと、ネットワーク全体で平均的にこれらの値未満の発生間隔が発生する場合は高トラフィック状態になると考えられ、DSPの送信待ち行列にメッセージ等が滞留し遅延時間が大幅に増大する可能性が高い。

4.2 メッセージ到着率

トラフィックは単位時間内に送信側で発生したメッセージ量を表し、スループットは単位時間内に受信側で受領したメッセージ量を表すと言える。つまり、受信側のスループットを送信側のトラフィックで割った比は、送信されたメッセージの受信側での到着率になる。本稿ではこの比を受信側のメッセージ到着率と定義し、両データリンクのメッセージ到着率を評価した。

リバースリンクにおけるVHF ACARSのメッセージ到着率(図5)は $\#AIR$ の増加に伴いメッセージ到着率が下がり、本シミュレーション条件下では0.7程度まで低下した。1機当たりのメッセージトラフィック発生率が同じでも、機数の増加によってネットワーク全体のトラフィックが増え伝送時の衝突による伝送ロスも増加するこ

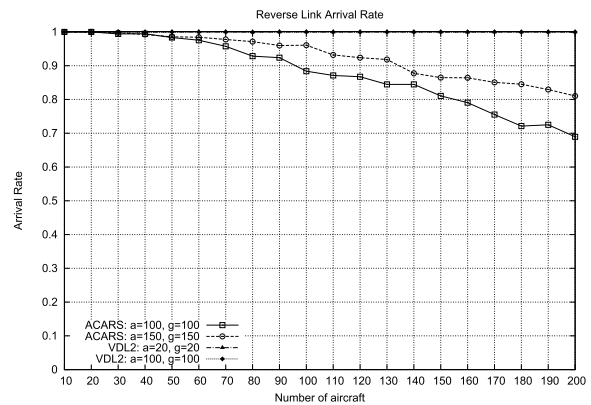


図5 リバースリンクメッセージ到着率

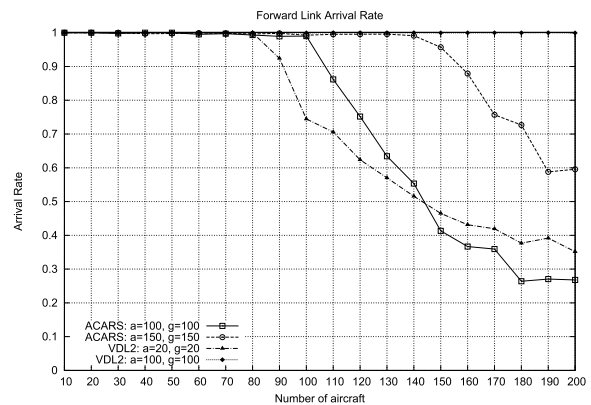


図6 フォワードリンクメッセージ到着率

とが主な原因である。

しかし実際に運用されているVHF ACARSの場合、リバースリンクでは基本的に伝送成功率が100%となる。この違いは、本シミュレーションではARINC specification 618[1]に規定する再送回数を超えた場合に送信ロスと判定しメッセージを破棄するが、実運用ではAIR側のアプリケーションないしはアビオニクスにおいて送信成功まで(受信側でのACK到着まで)繰り返し送信を試みる点にある。つまりARINC specification 618で規定しているデータリンク層より上位の層で、成功するまで送信を繰り返すことからアプリケーションとしては最終的に伝送成功率が100%になるのである。

一方、VDL2は $\#AIR$ によらずほぼ1.0を達成していた。VDL2ではVHF ACARSに比べて伝送レートが高いために実際のメッセージ回線占有時間が短くなり、衝突が起りにくくなる。今回、VDL2はVHF ACARSの5倍の情報発生

表4 メッセージ到着率による限界平均発生間隔評価

データリンク	g	#AIR _{max}	T_c [s]
VHF ACARS	150.0	140	11.8
	100.0	100	11.0
VDL2	20.0	80	2.75
	10.0	40	2.75
	7.62	30	2.79
	5.0	20	2.75

表5 最大スループット

(単位 [bps])	VHF ACARS	VDL2
フォワードリンク	900	1800
リバースリンク	850	2000

頻度（VHF ACARS で $g = a = 100$ に対して、VDL2 で $g = a = 20$ ）であっても、伝送されたメッセージをほとんど失うことなく到達させることができた。

同様にフォワードリンクにおけるメッセージ到着率を図6に示す。#AIRの増加に伴いメッセージ到着率が低下することが分かったが、低下原因が送信ロスのみとは考えにくい。4.1節で述べたように、DSPで発生した各AIRに対するメッセージは全て1つの送信待ち行列に格納されていく。#AIRが多ければDSPの送信待ち行列に多くのメッセージが滞留する状況が発生し、シミュレーション開始から時間が経過するほど滞留が多くなると考えられる。滞留状態が解消しないままシミュレーションが終了すると、メッセージは発生したものの送信処理されないためにスループットの計測が行われなくなり、メッセージ到着率が低下したものと考えられる。

メッセージ到着率に運用上の規定はないが、ここではメッセージ到着率0.99つまり99%を目安の閾値とし、閾値以上のメッセージ到着率である最大の航空機数とメッセージ送信間隔分布パラメータ g とから各ネットワークで許容できる限界の平均発生間隔を計算してみると、表4のようになった。

つまりメッセージ到着率に着目した場合の平均発生間隔の許容限界はVHF ACARSで11.0[s]、VDL2で2.75[s]と評価できる。

なお、図6のメッセージ到着率に対応した最大スループットは表5のようになった。

5 考察等

5.1 比較結果の考察

4.1節および4.2節で2種類の評価基準による平均発生間隔の許容限界をそれぞれ求めた。これらの結果からすればVDL2はVHF ACARSに比べて、例えば $12.7/2.75=4.62$ 倍まで混雑した通信負荷に対応可能、等と言える。VDL2とVHF ACARSの各伝送レートから考えると、理屈の上ではVDL2はVHF ACARSに比べて $31500/2400=13.1$ 倍まで狭い発生間隔で運用できそうだが、実際にはシミュレーション結果の方が低い値となった。また、スループットの面からするとVDL2のスループットが伝送レートの0.0635倍、VHF ACARSは伝送レートの0.375倍程度であり、伝送レートに比べて実効的な通信速度はかなり低いことがわかった。

VHF ACARS、VDL2ともCSMA方式を基礎としており、長いメッセージは1フレーム220バイトに分割される。すなわちシステム設計上長時間の連続送信はできない。VDL2はフレーム伝送時間がVHF ACARSの約1/13であり、メッセージ発生頻度が同じであればフレームが短いVDL2の方がフレーム衝突の確率は小さい。しかし、フレーム間の待ち時間は伝送時間に比例して短くなるわけではない。各無線局はフレーム単位で送信した後にACK応答を待つ必要があるため、次の送信開始までの時間が長いほど伝送効率が悪化する。これらの理由によって、VDL2はスループット自体はVHF ACARSよりも高いが、伝送レートに対するスループットの比がVHF ACARSに比べて低くなったものと考えられる。

一方、送信待ち時間は情報の発生頻度に大きく依存する。実効的な通信容量以上の情報発生頻度では、伝送路上での衝突が頻発し、特にDSP側の送信待ち行列で情報の滞留が増加する。滞留によって送信待ち時間が増え、遅延時間の増加を引き起こす。

5.2 仮定 $g = 5a$ での結果

4節では $g = a$ と仮定してシミュレーションを行った。これは現実よりも厳しい条件であるが、実際のVHF ACARSの通信記録によると、リバースリンクのメッセージ送信はフォワード

表 6 遅延時間による限界平均発生間隔評価 ($g = 5a$)

データリンク	g	#AIR _{max}	T_c [s]
VHF ACARS	500.0	160	34.4
	250.0	60	45.8
VDL2	50.0	120	4.6
	38.1	90	4.7
	25.0	70	3.9

リンクの約 5.0 倍の頻度で行われているとの結果が得られている [4]。そこで $g = 5a$ と仮定したシミュレーションも実施してみた。ここではフォワードリンク遅延時間から限界平均発生間隔を求めた結果を示す (表 6)。

VHF ACARS では DSP 側のメッセージ発生率が小さい (発生間隔が長い) ために 4.1 節より大きな値となったが, AIR 側の発生間隔に換算するとこれらの 1/5 に相当することから, それぞれ 6.9, 9.2 となる。つまり $g = 5a$ の仮定では AIR 側のメッセージ発生率は $g = a$ の場合よりも高めることが可能である。VDL2 も AIR 側の発生間隔に換算するとそれぞれ 0.78, 0.94, 0.92 となるため, AIR 側のメッセージ発生率を高くすることが可能である。また, 両者とも AIR メッセージ到着率も大幅に改善された。これらの主な理由としては, DSP 側のメッセージ発生率を抑えたために DSP 送信待ち行列の滞留が減少したこと, および ACK の送出手間が容易になったことが挙げられる。つまり滞留の解消によって送信待ち時間が減るとともに, シミュレーション終了までの未送出メッセージ数自体も抑えられたことになる。

なお $g = 5a$ の仮定の元では VHF ACARS の限界発生間隔は VDL2 の 8.8 倍 ($=34.4/3.9$) となり, 実運用に近い通信トラフィック環境では VHF ACARS に対する VDL2 の優位性が増加することがわかった。

6 まとめ

航空用の主なデータリンクのうち VHF 帯のデータリンクである VDL2 および VHF ACARS について, それぞれの特徴を調査し, 通信性能を評価してきた。評価手法としては, 各データリンクに準拠した仮想的な無線機を計算機上に再現し, プロトコルシミュレータによる多数機

環境下での通信性能を求めた。その結果, VDL2 は VHF ACARS に比べて約 4.6 倍混雑した通信負荷を処理可能 (実運用の通信トラフィック環境に近い条件下では約 8.8 倍) であることがわかった。

今後新たなデータリンクも登場してくると予想 [5] されているが, VHF ACARS も VDL2 もここ暫くの間は世界的に運用され続けていく予定である。本シミュレーションの結果が今後の VDL2 および VHF ACARS の運用・維持管理に役立てば幸いである。

謝辞

VHF ACARS 通信記録の収集にご協力いただきましたアビコムジャパンおよび国土交通省航空局の関係各位に感謝致します。

付録 A パレート分布

パレート分布はベキ分布の一種である。確率密度関数 $f(x)$ は, パラメータ a と c によって

$$f(x) = \frac{ca^c}{x^{c+1}} \quad (a \leq x < \infty) \quad (2)$$

で表される。なお, パレート分布の期待値 $E(x)$ は $c > 1$ ならば以下の式で求められる。

$$E(x) = \frac{ca}{c-1} \quad (c > 1) \quad (3)$$

参考文献

- [1] ARINC. Air/Ground Character-oriented Protocol Specification. Ch.4.0 VHF ACARS ARINC specification 618-5, ARINC, 2000.
- [2] ICAO. International Standards and Recommended Practices. Annex 10, Volume III, Part I, Chapter 6: VHF air-ground digital link (VDL), ICAO, 2001.
- [3] International Civil Aviation Organization. *Manual on VHF Digital Link (VDL) Mode 2*. International Civil Aviation Organization, 2001. Doc 9776.
- [4] 北折潤, 松久保裕二, 小園茂. 日本における VHF 帯航空移動通信トラフィックの解析. No. 101, pp. 37–41, Dec. 2007.
- [5] N. Fistas, B. Phillips, and J. Budinger. Future Communications Study — Action Plan 17, Final Conclusions and Recommendations Report. In *26th DASC*, pp. 4.B.6–1–14. IEEE, Oct. 2007.