

マルチキャスト通信における L_1 ノルム最小化による パケット損失率推定法とパスの選択法

吉川 泰司 中川 健治 渡部 康平

長岡技術科学大学 〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1

E-mail: tkichikawa@kashiwa.nagaokaut.ac.jp, nakagawa@nagaokaut.ac.jp, k_watabe@vos.nagaokaut.ac.jp

あらまし 通信事業にとってネットワークの内部状態の把握は重要な問題となる。特に、パケット損失率はネットワークの輻輳の最も直接的な指標であり、それを知ることは重要である。内部状態の推定のための手法の一つとして、ネットワークトモグラフィが存在する。ネットワークトモグラフィにはアクティブ計測とパッシブ計測がある。アクティブ計測はプローブパケットを送り計測する方法であり、パッシブ計測は端末間のユーザパケットをモニタリングすることで計測する方法である。パケット損失率推定においてアクティブ計測を使用すると、送出したプローブパケットによってネットワーク負荷が増大する。本研究では、従来のユニキャストにおけるアクティブ計測とパッシブ計測を併用した推定手法をマルチキャストに拡張した手法を提案し、従来手法よりもアクティブ計測パスを削減することにより負荷を低減させる。また提案法のアクティブ計測パスの組合せの選択方法について提案する。

キーワード パケット損失率, ネットワークトモグラフィ, 圧縮センシング

Packet loss rate estimation and path selection method by minimizing L_1 norm in multicast communication

Taiji KICHIKAWA, Kenji NAKAGAWA, and Kohei WATABE

Nagaoka University of technology 1603-1 kamitomioka, Nagaoka-shi, Niigata, 940-2188 Japan

E-mail: tkichikawa@kashiwa.nagaokaut.ac.jp, nakagawa@nagaokaut.ac.jp, k_watabe@vos.nagaokaut.ac.jp

Abstract Understanding the internal state of the network is an important issue for the communications business. In particular, packet loss rate is the most direct indicator of network congestion, and it is important to know it. Network tomography is one of the methods for estimating the internal state. Network tomography includes active measurement and passive measurement. Active measurement is a method of sending probe packets and passive measurement is a method of measuring user packets between terminals. When active measurement is used in packet loss rate estimation, the network load increases due to the transmitted probe packets. In this research, we propose a method that extends the conventional estimation method using active measurement and passive measurement in unicast to multicast, and reduces the load by reducing the number of active measurement paths. We also propose a method for selecting a combination of active measurement paths in the proposed method.

Key words Packet loss rate, Network tomography, Compressed sensing

1. 背景

通信事業者やネットワークの管理者にとってネットワークの内部状態の把握は重要な問題となる。ネットワークの内部状態にはパケット損失率、遅延、輻輳、ジッタなどがある。特にパケット損失率はネットワークの輻輳の最も直接的な指標であるため、それを知ることは重要になる。内部状態を把握するために様々な研究があり、その中にネットワークトモグラフィが存

在する。ネットワークトモグラフィは対象となるネットワークの end-to-end のパケットの計測により得られる情報からネットワークの内部状態であるリンク性能やノード状態を推定する技術であり、計測手法は大きく分けてアクティブ計測とパッシブ計測の 2 種類が存在する。

アクティブ計測はプローブパケットと呼ばれる計測用パケットを使用する手法である。プローブパケットをネットワークへ送出し、その応答を観測することによってネットワーク特性の

把握を行う手法である．この計測手法では本来の通信では必要としないトラヒックを生成するため，多用するとプローブのためのトラヒックがネットワークの輻輳を引き起こす恐れがある．パケット損失率推定においては計測対象とするネットワークにプローブパケットを送出し，パケットの送信数と受信数の比率から対象とするパスのパケット損失率を推定することができる．

パッシブ計測は観測点において実際に処理されているパケットをモニタリングすることによって，トラヒック情報の収集を行う手法である．この計測手法はネットワーク上に流れるパケットを記録して計測するためネットワークに影響を与えることはない．パケット損失率推定においてはネットワーク上にすでに流れるパケットのヘッダー情報からパケット送信数と受信数を推定し，送信受信ノード対に対するパケット損失率を計測することができる．

アクティブ計測はネットワークへの負荷と計測精度に，パッシブ計測は観測端末への負荷と計測精度にトレードオフの関係がある．パッシブ計測は通信する端末同士が負荷を受けるだけだが，アクティブ計測はネットワークへ影響を与える上，パケット損失率推定では損失を観測するとその通信は輻輳しているため，他の通信にも大きく影響を与える．そこでアクティブ計測だけでなく，パッシブ計測を使うことでアクティブ計測のネットワークへの影響を軽減させて，推定を行うことを目的とする．

2. 従来手法

2.1 パケット損失率推定

アクティブ計測はプローブパケットを送信し，プローブパケットを送信したパスのパケット損失率 l を計測する．送信元から受信先へパケット数 n_S のプローブパケットを送信し，受信先でパケット数 n_R 受信したとすると l は次のように求められる．

$$l = 1 - \frac{n_R}{n_S} \quad (1)$$

パッシブ計測は送信元から受信先へ流れるパケットをモニタリングし，送信元から受信先内のネットワークのパケット損失率 α を計測する．送信元から受信先へ流れるパケット数を N_S ，受信先でパケット数 N_R 受信したとすると α は次のように求められる．

$$\alpha = 1 - \frac{N_R}{N_S} \quad (2)$$

2.1.1 マルチキャストのパケット損失率推定

従来のマルチキャストにおけるリンクのパケット損失率推定法としては，アクティブ計測のみを用いる手法が存在する．ネットワークにおいてパケット損失率が高いリンクは少数であり，大部分のリンクのパケット損失率は 0 としてスパース性を持つとして，線形方程式を高速に解くことができる L_1 ノルム最小化を用いて推定する手法が存在する．

送信元から受信先へのパス $W_i (i = 1, 2, \dots, M)$ を通過するように送信されたプローブパケットのパケット数を $n_{S,i}$ ，パス

W_i を通り受信先で受信されたパケット数を $n_{R,i}$ がアクティブ計測によって得られる．これにより，パス W_i のパケット損失率 $l_i (0 \leq l_i \leq 1)$ は (1) 式より次のように計算できる．

$$l_i = 1 - \frac{n_{R,i}}{n_{S,i}} \quad (3)$$

パス W_i に含まれるリンク $e_j (j = 1, 2, \dots, L)$ のパケット損失率を $q_j (0 \leq q_j \leq 1)$ とする．リンク毎のパケット廃棄が独立であると仮定すると， l_i と q_i の関係は次のように表すことができる．

$$1 - l_i = \prod_{e_j \in W_i} (1 - q_j) \quad (4)$$

さらに， $x_j = -\log(1 - q_j)$ ， $y_i = -\log(1 - l_i)$ としてベクトル表示すると次のように変形できる．

$$\vec{y} = A\vec{x} \quad (5)$$

$\vec{x} = (x_i)$ ， $\vec{y} = (y_i)$ はそれぞれリンクのパケット損失率 \vec{q} とパスのパケット損失率 \vec{l} の関数ベクトルであり， l_i と y_i ， q_j と x_j の関係は次のようになる．

$$l_i = 1 - \exp(-y_i) \quad (6)$$

$$q_j = 1 - \exp(-x_j) \quad (7)$$

A はルーティング行列と呼ぶ．ルーティング行列は行がパス，列がリンクに対応しており，ネットワークの構成を示す．例として，図 1 のようなツリーは，4 行 6 列の行列となる．

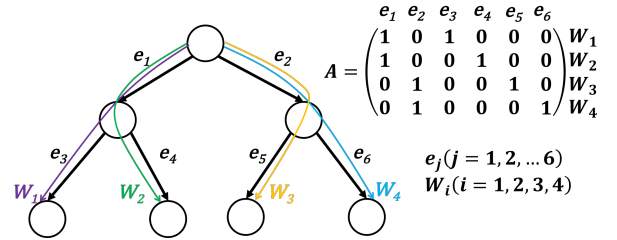


図 1 ルーティング行列の例

(5) 式で線形方程式が得られた．これにより，(5) 式を制約条件とした L_1 ノルム最小化問題として，次のように定式化される．

$$\vec{x} = \operatorname{argmin}_{\vec{x}} \|\vec{x}\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \vec{y} = A\vec{x} \quad (8)$$

これにより， \vec{x} を推定し，リンクのパケット損失率 q_j を得る．さらに，2.2 で説明する内容で計測するパスのみを抜き出した A_o を用いて次の式で推定を行う．

$$\vec{x} = \operatorname{argmin}_{\vec{x}} \|\vec{x}\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \vec{y}_o = A_o\vec{x} \quad (9)$$

2.1.2 ユニキャストのパケット損失率推定

ユニキャストのパケット損失率推定の従来手法ではアクティブ計測とパッシブ計測を併用する．アクティブ計測については 2.1.1 と変わらないため省略する．パッシブ計測について説明する．パス W_i に流れるパケット数を N_i とすると，パス W_i を通って送信元から送られ受信先で受信されたパケット数 $N_{R,i}$

は次のように表される.

$$N_{R,i} = N_i(1 - l_i) \quad (10)$$

また, パス W_i を通って送信元から送られ受信先で受信されたパケット数は $N_R = \sum_i^{|W|} N_{R,i}$ となるため, 次のように表される.

$$N_R = \sum_i^{|W|} N_i(1 - l_i) \quad (11)$$

両辺を送信元から送った全パケット数 $N_S = \sum_i^{|W|} N_{S,i}$ で割って式変形するとネットワークのパケット損失率 α は (2) 式より次のように表される.

$$\alpha = \vec{\beta}^T \vec{l} \quad (12)$$

$\beta = (\beta_i), \beta_i = \frac{N_{S,i}}{N_S}$ は総送信パケット数とパス W_i を通ったパケットの比率であり, ネットワークでそのパスが使われる重要度, 重みを表している. このアクティブ計測とパッシブ計測を併用した手法ではパッシブ計測からネットワークのパケット損失率を計測しているため, アクティブ計測のパスを減らすことができる. アクティブ計測で計測を行うパスと未計測のパスに分割する. 例えば, ルーティング行列 A はアクティブ計測を行うパスの集合 A_o , アクティブ計測を行わないパスの集合 A_m として次のように分割する.

$$A = (A_o, A_m) \quad (13)$$

また, $\vec{y}, \vec{l}, \vec{\beta}$ も分割する.

$$\vec{y}^T = (\vec{y}_o^T, \vec{y}_m^T) \quad (14)$$

$$\vec{l}^T = (\vec{l}_o^T, \vec{l}_m^T) \quad (15)$$

$$\vec{\beta}^T = (\vec{\beta}_o^T, \vec{\beta}_m^T) \quad (16)$$

これにより, アクティブ計測, パッシブ計測ともに次のようになる.

$$\vec{y}_o = A_o \vec{x} \quad (17)$$

$$\alpha = \vec{\beta}_o^T \vec{l}_o + \vec{\beta}_m^T \vec{l}_m \quad (18)$$

ここで, パッシブ計測から得られるネットワークのパケット損失率を観測値とし, \vec{x} を未知数とする線形方程式を新たに立て, \vec{x} に関する L_1 ノルム最小化問題とすることでリンクのパケット損失率を推定する. (6) 式を変形してテイラー展開する.

$$y_i = -\log(1 - l_i) \quad (19)$$

$$= \sum_{k=1}^{\infty} \frac{l_i^k}{k} \quad (20)$$

$$= l_i + \frac{l_i^2}{2} + \frac{l_i^3}{3} + \dots \quad (21)$$

このとき, l_i はパスのパケット損失率であるため $0 \leq l_i \leq 1$ の値しか取らず, またパケット損失率は一般に非常に小さく IP パケットのネットワーク品質を勧告する ITU-T-Y.1514 においてクラス 0 ではパケット損失率の規定値を 0.1% と定めている.

以上のことから, 第 2 項以降は十分小さく無視できると判断し次のように近似する.

$$y_i = l_i \quad (22)$$

ここで (18) 式より

$$\alpha - \vec{\beta}_o^T \vec{l}_o = \vec{\beta}_m^T \vec{l}_m \quad (23)$$

$$= \vec{\beta}_m^T \vec{y}_m \quad (24)$$

$$= \vec{\beta}_m^T A_m \vec{x} \quad (25)$$

とし, \vec{x} を未知数とした線形方程式を得ることができる. 以上より, (17) 式と (25) 式を制約条件とする L_1 ノルム最小化問題として表すと, 次のように定式化される [1].

$$\vec{x} = \operatorname{argmin}_{\vec{x}} \|\vec{x}\|_1 \quad \text{s. t.} \quad \vec{y}_o = A_o \vec{x}, \alpha - \vec{\beta}_o^T \vec{l}_o = \vec{\beta}_m^T A_m \vec{x} \quad (26)$$

2.2 計測パスの選択

逆問題において, 正しい解が再構成されることを完全再現と呼び, 完全再現の可否は観測行列 A の性質により決まる. L_1 ノルム最小化問題の完全再現性の判定方法は様々な方法が研究されている. その中に零空間特性を用いたものがある. 観測行列 $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$ の零空間とは

$$\ker(A) := \{\vec{x} \in \mathbb{R}^N : A\vec{x} = \vec{0}\} \quad (27)$$

である. 条件 $\vec{y} = A\vec{x}$ を満たすようなスパースベクトル \vec{x} が多く存在する場合に完全再現が難しくなる. 解の一意性を示す方法に spark により示されるものがある. $\operatorname{spark}(A)$ は行列 A の一次従属な列ベクトルの数の最小値として定義される. この時, 完全再現十分条件として

$$\operatorname{spark}(A) > 2K \quad (28)$$

ならば $\vec{y} = A\vec{x}$ を満たす K -スパース (非零成分の個数が高々 K 個) なベクトル \vec{x} が多くとも 1 つ存在する. これにより, $\operatorname{spark}(A)$ が大きいほど再現に有利であり, 一意な解が存在することになる. しかし, spark を求めるために行列 $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$ の列ベクトルの全ての組について一次従属か否かを判別する必要があり, その計算量は $O(2^N)$ と列数に対して指数関数的に増加するため現実的ではない.

計算量の問題を解決するためにインコヒーレンスを用いて評価を簡単にする方法が存在する. インコヒーレンスは, 行列 A の異なる 2 つの列ベクトル \vec{a}_i, \vec{a}_j の方向余弦の絶対値の最大値

$$\mu(A) := \max_{1 \leq i < j \leq N} \frac{|\langle \vec{a}_i, \vec{a}_j \rangle|}{\|\vec{a}_i\|_2 \|\vec{a}_j\|_2} \quad (29)$$

と定義される. インコヒーレンスは (29) 式より, 異なる列の全ての組合せで方向余弦を評価するだけであるから, 計算量は $O(N^2)$ になり, spark よりも計算量を抑えられる. インコヒーレンスを用いてスパークの下界を

$$\operatorname{spark}(A) \geq \left(1 + \frac{1}{\mu(A)}\right) \quad (30)$$

と求めることができる。零空間特性による再現条件 (40) 式より、

$$K < \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\mu(A)} \right) \quad (31)$$

を L_1 ノルム最小化における完全再現性の十分条件とすることができる。(43) 式右边を

$$\tau(A) := \frac{1}{2} \left(1 + \frac{1}{\mu(A)} \right) \quad (32)$$

と定義し、アクティブ計測を用いた推定においては、計測パス A_o を用いて

$$\tau(A_o) > K \quad (33)$$

を満たせば解を再構成できる [3][5]。アクティブ計測のみを用いた推定では、(33) 式の条件かつ「 A_o に全てのリンクを含む」ことで削減できる計測パスを選択できる。

3. 提案手法

3.1 マルチキャストへの拡張

パッシブ計測の式は (11) 式を変形することで (12) 式とされていた。今回は受信先が複数になり α がスカラーからベクトル、 β がベクトルから行列に変わることを示す。まず、(6) 式は受信機が複数になるため受信されたパケット数は $N_{R_k} = \sum_i^{|W|} N_{R_k,i}$ とすれば

$$\begin{pmatrix} N_{R_1} \\ \vdots \\ N_{R_{|R|}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sum_i^{|W|} N_{R_1,i}(1-l_i) \\ \vdots \\ \sum_i^{|W|} N_{R_{|R|},i}(1-l_i) \end{pmatrix} \quad (34)$$

となる。送信元から受信機 R_k に送るパケット数を $N_{S_{R_k}} = \sum_i^{|W|} N_{S_{R_k},i}$ とすれば、(11) 式から (12) 式の変形と同様に、

$$\begin{aligned} \begin{pmatrix} 1 - \frac{N_{R_1}}{N_{S_{R_1}}} \\ \vdots \\ 1 - \frac{N_{R_{|R|}}}{N_{S_{R_{|R|}}}} \end{pmatrix} &= \begin{pmatrix} 1 - \sum_i^{|W|} \frac{N_{R_1,i}(1-l_i)}{N_{S_{R_1},i}} \\ \vdots \\ 1 - \sum_i^{|W|} \frac{N_{R_{|R|},i}(1-l_i)}{N_{S_{R_{|R|},i}}} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \sum_i^{|W|} \frac{N_{R_1,i}}{N_{S_{R_1}}} l_i \\ \vdots \\ \sum_i^{|W|} \frac{N_{R_{|R|},i}}{N_{S_{R_{|R|}}}} l_i \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} \frac{N_{R_1,1}}{N_{S_{R_1},1}} & \cdots & \frac{N_{R_1,1}}{N_{S_{R_1},M}} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{N_{R_{|R|},1}}{N_{S_{R_{|R|},1}}} & \cdots & \frac{N_{R_{|R|},1}}{N_{S_{R_{|R|},M}}} \end{pmatrix} \vec{l} \\ \vec{\alpha} &= B^T \vec{l} \end{aligned} \quad (35)$$

となり、 $\vec{\alpha}$ は $|R|$ 次元ベクトル、 B は $M \times |R|$ の行列となり、(35) 式が 1 対多のパッシブ計測の式となる。したがって制約条件を変更し、

$$\vec{x} = \operatorname{argmin}_{\vec{x}} \|\vec{x}\|_1 \quad \text{s.t.} \quad \vec{y}_o = A_o \vec{x}, \vec{\alpha} - B_o^T \vec{l}_o = B_m^T A_m \vec{x} \quad (36)$$

としてマルチキャストのリンクのパケット損失率を推定する。

3.2 パスの選択法

(36) 式を用いた推定も L_1 ノルム最小化を用いるため、(33) 式の条件を用いることができる。パッシブ計測も使用しているため A_o に全てのリンクを含む必要がない。したがって、 A_o に含まれないリンクについて考える。パッシブ計測の式は受信機の数 $|R|$ だけ得られるため、 A_o に含まれないリンク数は $|R|$ 以下でなければ解を得ることができない。さらに、スパース性があるとしても 1 つの式に 2 つの変数が存在する場合は解が一意に定まらない。したがって (33) 式の条件かつ「 A_o に含まれないリンクが 1 対 1 のネットワーク内に 1 つ以下」であれば推定可能な計測パスの組合せを選択できる。この 2 つの条件を満たす場合、計測パス数が最少の組合せが任意のリンクを推定可能となる。

4. シミュレーション

4.1 パケット損失率推定

図 2 に示す 1 対 3 のトポロジーで数値シミュレーション行う。パス数 $M = 12$ 、リンク数 $L = 19$ 、損失発生リンク数を 1 とする。未計測パスは全ての組合せで行う。損失発生リンク数が 1 であるため、損失の発生したリンクのパケット損失率のみが 0 よりも大きい値で推定された場合推定可能とする。リンクのパケット損失全てのリンクを推定可能な組合せの結果を表 1 に示す。アクティブ計測のみ場合はアクティブ計測の計測パス数が 10 の場合が最小であり、提案法では 8 が最小となっている。したがって、アクティブ計測のパスを 20% 削減することができた。アクティブ計測と比べて提案法が計測パス数が少なくなったのは、パッシブ計測によって式の本数が増えたことによりアクティブ計測のパスを減らすことができたからである。

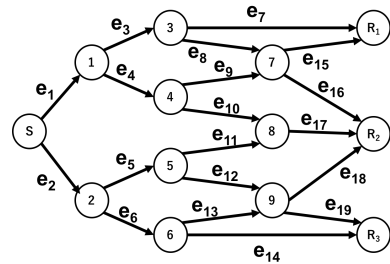


図 2 シミュレーショントポロジー

表 1 計測パス数に対する推定可能な組合せ数

| 計測パス数 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | ... |
|-----------|----|----|----|----|---|-----|
| アクティブ計測のみ | 8 | 16 | 0 | 0 | 0 | ... |
| 提案法 | 8 | 24 | 32 | 15 | 0 | ... |

4.2 計測パスの選択

トポロジーは同じく図 2 とし、3.2 で説明した全ての組合せの中から条件を満たした数を表 2 に示す。表 2 の条件を満たし

た組合せの中で、全てのリンクを推定可能な組合せの割合を表3に示す。例えば、計測パス数8本の場合では、完全再現十分条件を満たし、全てのリンクを推定可能な組合せ数は3で75%となったが、提案法の条件を満たすものは3であり、そのうち全てのリンクを推定可能な組合せは3で100%となった。表3より、完全再現十分条件だけでは A_0 に含まれないリンクは推定可能かどうかを判別できないため、真であっても推定不可能な組合せが複数存在した。しかし、提案法の条件を満たした全ての組合せは提案法で任意のリンクを推定可能であった。

表2 計測パス数に対する条件を満たす組合せ数

| 計測パス数 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | ... |
|----------|----|----|----|---|---|-----|
| 完全再現十分条件 | 8 | 20 | 16 | 4 | 0 | ... |
| 提案法 | 8 | 16 | 16 | 3 | 0 | ... |

表3 表2に対する推定可能な組合せ数の割合

| 計測パス数 | 11 | 10 | 9 | 8 | 7 | ... |
|--------------|-----|-----|-----|-----|---|-----|
| 完全再現十分条件 [%] | 100 | 80 | 100 | 75 | 0 | ... |
| 提案法 [%] | 100 | 100 | 100 | 100 | 0 | ... |

5. ま と め

パケット損失率推定においてアクティブ計測によるプローブパケットは他の通信に大きく影響を与える。そのためアクティブ計測の計測パスを減らし、ネットワークに与える負荷を抑えることを目的とした。従来法のユニキャストのリンクのパケット損失率推定法をマルチキャストに拡張し、従来のアクティブ計測による L_1 ノルム最小化法と比べアクティブ計測の計測パス数を少なくすることができた。今回シミュレーションを行ったトポロジーにおいては、アクティブ計測の計測パス数を20%削減することができた。これにより提案法はアクティブ計測によりプローブ負荷を減らすことができたため、ネットワーク負荷を抑えることができる。また、提案法においてどのパスを計測するのかを決めるために条件を設定した。この条件を満たした組合せは全て提案法で推定可能であったため、計測パスを正しく選択できることを示した。しかし、全ての組合せを調べる全探索になってしまっているため、効率的に計測パスを選択するアルゴリズムが必要となる。

文 献

- [1] 手崎達也, 渡部康平, 中川健治, “ L_1 ノルム最小化によるパケット損失率推定の高速度化,” 電子情報通信学会 総合大会, 2018.
- [2] 宮本敦史, 渡辺一帆, 池田和司, “アクティブ計測とパッシブ計測を用いたパケット損失率推定法,” 電子情報通信学会, 情報論的学習理論と機械学習, 信学技報, vol.111, no.480, pp.117–121, 2012.
- [3] 三村和史, “圧縮センシング: 疎情報の再構成とそのアルゴリズム (時間周波数解析の理論とその理工学的応用),” 数理解析研究所講究録, vol.1803, pp.26–56, 2012.
- [4] 田中利幸, “圧縮センシングの数理,” 電子情報通信学会 基礎・境界ソサイエティ Fundamentals Review, vol.4, no.1, pp.39–47, 2010.
- [5] 和田山正, “圧縮センシングにおける完全再現十分条件について,” 日本神経回路学会誌, vol.17, no.2, pp.63–69, 2010.

- [6] M.H. Firooz and S. Roy, “Network tomography via compressed sensing,” Global Telecommunications Conference (GLOBECOM 2010)IEEE, pp.1–5 2010.
- [7] T. Braun, M. Diaz, J.E. Gabeiras, and T. Staub, End-to-End Quality of Service Over Heterogeneous Networks, Springer Science & Business Media, 2008.
- [8] E.J. Candes and M.B. Wakin, “An introduction to compressive sampling,” IEEE Signal Processing Magazine, vol.25, no.2, pp.21–30, March 2008.