Die Erweiterung des Internets zum mobilen Teilnehmer – Ansätze zur verkehrstheoretischen Dimensionierung paketvermittelnder Funknetze

Ulrich Vornefeld

Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
RWTH Aachen
E-Mail: Ulrich.Vornefeld@comnets.rwth-aachen.de

Zusammenfassung — **Der Vortrag gibt einen Überblick über mögliche Modellierungs- und Analyseansätze für paketvermittelnde Mobilfunknetze, die im Zuge der Konvergenz von Internet und Mobilfunk eine immer größere Rolle spielen. Basierend auf der Theorie der Markovschen Ankunftsprozesse (MAP und BMAP) nach [1], werden Ansätze zur Modellierung von Verkehrsquellen vorgestellt, verkehrstheoretische Modelle für den Funkkanal diskutiert und signifikante Dimensionierungs- und Dienstgütekenngrößen mit Hilfe von matrixanalytischen Methoden bestimmt.**

I. Einführung

Die rasante Entwicklung des Internets ist zur Zeit der prägende Faktor für die Informationsgesellschaft und führt zu einem enormen Anstieg von paketvermitteltem Datenverkehr. Mit Blick auf die sich ändernden Verkehrsstrukturen sehen immer mehr Netzbetreiber eine strategische Migration zu IP-basierten Backbone-Netzen vor. Gleichzeitig gewinnen die Mobilfunknetze immer mehr an Bedeutung. In einigen Ländern, wie z.B. in Finnland übersteigt die Anzahl der Mobilteilnehmer schon die Zahl der Festnetzanschlüsse. Die Konvergenz beider Entwicklungen zeigt den zukünftigen Trend einer wachsenden Nachfrage nach Internetdiensten für den mobilen Teilnehmer. Dies spiegelt sich in der Einführung von Datendiensten in bestehenden Mobilfunknetzen, im Rahmen von WAP (Wireless Application Protocol), HSCSD (High-Speed Circuit-Switched Data) und GPRS (General Packet Radio Service) sowie in der Standardisierung zukünftiger Mobilfunknetze wie UMTS (Universal Mobile Telecommunications System), HIPERLAN (High Performance LAN) und IEEE 802.11 wider. Für die Einführung dieser neuen Datendienste ist neben der der Übertragungstechnik und den Kommunikationsprotokollen die Dimensionierung der Netze von zentraler Bedeutung, die aus zwei verschiedenen Perspektiven betrachtet wird:

- Dimensionierung des Netzes: Welche Kapazität muß für eine zu erwartende Anzahl von Teilnehmern bereitgestellt werden.
- Verbindungsannahmesteuerung: Wieviele Teilnehmer mit welchen Diensten können bei gegebener Kapazität des Netzes zugelassen werden.

Randbedingung bzw. Optimierungskriterium bei diesen Fragestellungen ist die Dienstgüte (*Quality of Service*), die der Benutzer erfährt. Während diese Dienstgüte in den leitungsvermittelnden Netzen im wesentlichen durch Blockierwahrscheinlichkeiten beschrieben wird, wird sie in paketvermittelnden Netzen durch Größen wie Paketverlustwahrscheinlichkeiten und Paketverzögerungen quantifiziert. Mit dem Wechsel der Vermittlungstechnik geht auch ein Wechsel der verkehrstheoretischen Beschreibungstechniken einher. So lassen sich in leitungsvermittelnden Systemen die Blockierwahrscheinlichkeiten vergleichsweise einfach mit Hilfe der Erlang-B Formel bestimmen. Paketvermittelnden Netzen entziehen sich dieser eleganten Modellierung und verlangen die Anwendung neuer Verfahren zur Bestimmung der Dienstgütekenngrößen. Mit der Vermittlungstechnik wechselt auch die Granularität der Betrachtungsweise. Werden im im leitungsvermittelnden Fall nur die einzelnen Rufe betrachtet, so gehen im paketvermittelnden Fall die einzelnen Pakete in die Betrachtung ein, was zwangsläufig zu ungleich aufwendigeren Modellen und Analysen führt. Im folgenden werden der Markovsche Ankunftsprozeß (Markovian Arrival Process, MAP) bzw. der Batch Markovian Arrival Process, BMAP, der auch Gruppenankünfte zuläßt, betrachtet. Für diese Prozesse stehen umfangreiche matrixanalytische Methoden zur Verfügung, die eine algorithmische Bestimmung der charakteristischen Größen erlauben. Es wird untersucht, wie mit Hilfe dieser Prozesse Verkehrsquellen und der Funkkanal möglichst realistisch modelliert werden können, um dann im Rahmen der zur Verfügung stehenden analytischen Methoden, Antworten auf Fragen der Dimensionierung oder Verbindungsannahme zu finden.

II. Modelle für Verkehrsquellen

Bei der Entwicklung von Verkehrsmodellen für paketvermittelnde Funknetze sind drei wesentliche Randbedingungen zu beachten:

- Es ist inzwischen wohlbekannt, daß Ankunftsprozesse in paketvermittelnden Netzen, wie dem Internet, Langzeitabhängigkeiten aufweisen und die Verteilungen z.B. für die Paketgrößen ein ausgeprägtes *heavy tailed*-Verhalten zeigen.
- Funknetze stellen im Vergleich zum Festnetz geringere Übertragungsbandbreite für den einzelnen Nutzer zur Verfügung, wobei gleichzeitig deutlich höhere Entgelte zu zahlen sind. Daraus resultiert ein grundlegend anderes Nutzerverhalten z.B. im Hinblick auf Sitzungsdauern und die Größe der übertragenen Objekte.
- Funkkanäle sind mit deutlich höheren Übertragungsfehlerwahrscheinlichkeiten behaftet, als Festnetzleitungen. Bei gesicherter Übertragung müssen also gestörte Pakete wiederholt werden und tragen somit zur Gesamtlast und vor allem zur Ende-zu Ende Verzögerung in nicht zu vernachlässigender Weise bei. Dabei verursachen die notwendigen Protokolle zur Fehlersicherung zusätzliche Signalisierlast.

Wir gehen von den Verkehrsmessungen an der Modembank der Universität Berkely [2] aus, die aufgrund der geringen Bandbreite für den einzelnen Nutzer geeignet erscheinen, solange entsprechende Messungen in den Mobilfunknetzen noch nicht verfügbar sind. Die Modellierung des Ankunftsprozesses erfolgt durch die Parametrierung eines BMAPs. Dabei gilt es die *Heavy tailed*-Eigenschaften der Verteilungen in das Modell zu integrieren. Da sich selbst schon eine der einfachsten *Heavy-tailed*-Verteilungen, die Pareto-Verteilung, der Analyse entzieht – für einen großen Parameterbereich läßt sich keine Laplace-Transformierte bilden – muß die *Heavy tailed*-Eigenschaft angenähert werden. Dies erfolgt durch eine hyperexponentielle

Verteilung mit k Phasen [3], wobei Algorithmen zur Bestimmung der Parameter dieser Verteilung gefunden werden müssen. Der vorgeschlagene Algorithmus in [3] führt leider nur selten zu brauchbaren Ergebnissen und das Marquardt-Levenberg Verfahren ist aufwendig. Im Rahmen unserer Arbeiten wurden gute Ergebnisse mit Hilfe von genetischen *Curve-Fitting* Algorithmen erzielt, wobei hier modellbedingt natürlich nicht das globale Optimum sondern nur Lösungen mit einer vorgegebenen Genauigkeit gefunden werden können.

III. Modelle für den Funkkanal

Mit Blick auf die Fragestellungen zur Netzdimensionierung und Verbindungsannahmesteuerung spielt der Funkkanal insofern eine Rolle, als daß Übertragungsfehler in Verbindung mit den eingesetzten Protokollen zu Übertragungswiederholungen führen, für die zusammen mit der entstehenden Signalisierlast, zusätzliche Übertragungskapazität bereitgestellt werden muss. Auch zur verkehrstheoretische Modellierung des Funkkanals wird ein BMAP verwendet, bei dem die durch den Fehlerprozeß hervorgerufenen Übertragungswiederholungen als zusätzlicher Ankunftsprozeß betrachtet werden, der den Originalprozeß überlagert. Die Eigenschaften dieses Prozesses werden vom Fehlerprozeß der Funkverbindung und dem eingesetzten Sicherungsprotokoll bestimmt. Der BMAP wird so parametriert, daß die erzeugten Zwischenankunftszeiten, die Zwischenankunftszeiten der Quittungen des Sicherungsprotokolls nachbilden. Erhält der Sender eine Quittung, so werden eine Anzahl von Paketen als empfangen bzw. als nicht empfangen quittiert, die dann erneut zu senden sind. Abhängig von der Konfiguration der Funkstrecke können mit Hilfe einer Quittung auch mehrere Pakete zur wiederholten Übertragung angefordert werden. Dies wird durch Gruppenankünfte innerhalb des überlagerten Ankunftsprozesses nachgebildet, bei dem die Gruppengröße, der Anzahl der als nicht korrekt empfangen quittierten Pakete entspricht. Grundsätzlich lassen sich zwei Modelle für den Fehlerprozeß unterscheiden:

- Ein Modell, das statistisch unabhängig verteilte Fehler erzeugt, indem davon ausgegangen wird, das jedes Paket mit einer konstanten Wahrscheinlichkeit gestört wird.
- Modelle, die die Korrelationsstruktur von Büschelfehler, wie sie typisch sind für Mobilfunkkanäle, nachbilden, wie die Modelle von *Gilbert* oder *Fritchman*, die auf Markovketten basieren.

Dabei führt das unkorrelierte Fehlermodell im Vergleich zu den korrelierten Modellen bei gleicher mittlerer Fehlerwahrscheinlichkeit zu deutlich abweichenden Ergebnissen. Nimmt man an, daß man im Hochlastfall nach der Übertragung von jeweils $n = 10$ Paketen (dies entspricht einem Rahmen) eine Quittung für diese Pakete erhält, so gehorcht im unabhängigen Fall die Wahrscheinlichkeit, daß i dieser 10 Pakete gestört sind einer Binomialverteilung. Bei einem Fehlermodell nach Gilbert hingegen wechselt der Funkkanal zwischen einem guten Zustand, in dem keine Fehler auftreten und einem schlechten Zustand in dem Fehler mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit auftreten. In Tab. 1 werden die Wahrscheinlichkeiten $p(i)$ für das Auftreten von i Fehlern im unkorrelierten und im korrelierten Modell verglichen. Obwohl der Erwartungswert, daß ein einzelnes Paket gestört wird in beiden Fällen gleich ist (0.025), erkennt man doch die grundlegend andere Verteilung. Während im unkorrelierten Fall das Auftreten von mehr als 5 Fehlern in einem Rahmen schon sehr unwahrscheinlich ist, tritt im korrelierten Modell sogar die Störung des vollständigen Rahmens noch vergleichsweise häufig auf. Der BMAP wird durch die Ankunftsmatrizen D_k mit $k = 0 \dots n$ beschrieben:

i	unkorr.	korr.	i	unkorr.	korr.
0	0.776	0.96603	6	$4.633 \cdot 10^{-8}$	0.00171
1	0.199	0.00221	7	$6.789 \cdot 10^{-10}$	0.00164
2	0.023	0.00207	8	$6.527 \cdot 10^{-12}$	0.00150
3	0.0016	0.00207	9	$3.719 \cdot 10^{-14}$	0.00149
4	$7.047 \cdot 10^{-5}$	0.00191	10	$9.537 \cdot 10^{-17}$	0.01754
5	$2.168 \cdot 10^{-6}$	0.00180			

Tabelle 1: Wahrscheinlichkeiten $p(i)$ für das Auftreten von i Fehlern in einem Rahmen bei unkorreliertem und korreliertem Fehlermodell

$$D_0 = \begin{pmatrix} -\lambda_1 & \lambda_1 p_{12}(0) & \dots & \lambda_1 p_{1k}(0) \\ \lambda_2 p_{12}(0) & -\lambda_2 & \dots & \lambda_2 p_{2k}(0) \\ \dots & \dots & & \dots \\ \lambda_k p_{k1}(0) & -\lambda_k p_{k2}(0) & \dots & -\lambda_k \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$D_k = \begin{pmatrix} \lambda_1 p_{11}(k) & \lambda_1 p_{12}(k) & \dots & \lambda_1 p_{1k}(k) \\ \lambda_2 p_{12}(k) & \lambda_2 p_{22}(k) & \dots & \lambda_2 p_{2k}(k) \\ \dots & \dots & & \dots \\ \lambda_k p_{k1}(k) & \lambda_k p_{k2}(k) & \dots & \lambda_k p_{kk}(k) \end{pmatrix} \quad (2)$$

wobei $1/\lambda_i$ die mittlere Aufenthaltsdauer in dem jeweiligen Zustand der steuernden Markovkette beschreibt, $p_{ij}(0)$ gibt die Zustandsübergangswahrscheinlichkeiten ohne Ankünfte an und $p_{ij}(k)$ die Wahrscheinlichkeit der Zustandsübergänge zu denen k Pakete im System eintreffen.

Für die Modellierung des überlagerten Ankunftsprozesses werden die Wahrscheinlichkeiten $p_{ij}(0)$ und $p_{ij}(k)$ aus den $p(i)$ in Tab. 1 abgeleitet. Weiterhin sind die λ_i zu bestimmen. Bei dem hier betrachteten Modell erreichen die Quittungen den Sender in äquidistanten Abständen von einem Rahmen, so daß sich eine deterministische Zwischenankunftszeit ergibt, die nicht direkt dargestellt werden kann, sondern z.B. durch eine Erlang-k Verteilung angenähert werden muß. Da aber auch die Quittungsübertragung über den fehlerhaften Funkkanal erfolgt, werden realitätsnähere Modelle Verteilungen mit größerer Varianz für die Zwischenankunftszeiten enthalten.

IV. Überlagerung und Analyse der Prozesse

Sind die Parameter für die Prozesse des Quellverkehrs und für den überlagernden Prozeß, der aus dem Fehlersicherungsprotokoll resultiert, bestimmt, so lassen sich die j BMAPs mit Hilfe der Kronecker-Summe zu einem resultierenden BMAP überlagern:

$$D_k = D_k(1) \oplus \cdots \oplus D_k(j), \quad k \geq 0 \quad (3)$$

Der so gewonnene Prozeß wird als Ankunftsprozeß eines geeigneten Warteraummodells (z.B. BMAP/D/1) verwendet, und mit Hilfe matrixanalytischer Algorithmen die interessierenden Kenngrößen wie z.B. die Verteilungen für die Warteschlangenbelegung und Wartezeiten bestimmt, aus denen sich dann wieder die Dienstgütekenngrößen ableiten lassen.

V. Literatur

[1] D. Lucantoni, “The BMAP/G/1 queue: A tutorial,” in *Models and Techniques for Performance Evaluation of Computer and Communication Systems, L. Donatiello and R. Nelson Editors, Springer Verlag*, pp. 331–358, 1993.

[2] “The internet traffic archive,” http://ita.ee.lbl.gov.

[3] A. Feldmann and W. Whitt, “Fitting mixtures of exponentials to long-tail distributions to analyze network performance models,” *Performance Evaluation*, vol. 31, pp. 245–279, 1998.