



Technische Universität Berlin

Fakultät IV: Elektrotechnik und Informatik

Fachgebiet INET

Prof. Anja Feldmann, Ph.D.

ExOR: Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks

Seminar

Network Architectures: Internet Routing

Wintersemester 2007/08

Christian Deutschmann
cappiman@cs.tu-berlin.de

Betreuer: Dipl. Inf. Harald Schiöberg

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	2
Kurzfassung	3
1. Einleitung	3
2. Funktionsweise von ExOR.....	4
Grundidee	4
Design	5
Knotenzustand	5
Paket-Format.....	5
Batch-Vorbereitung.....	6
Forwarder List.....	6
Paket-Empfang.....	6
Scheduling	6
Vervollständigung der Übertragung.....	7
3. Messergebnisse und Evaluierung	7
4. Weitere Messergebnisse und Deutung	8
5. Ähnliche Arbeiten	9
6. Zusammenfassung	9
Referenzen	9

Kurzfassung

Drahtlose Netzwerke nutzen für die Kommunikation über mehrere Knoten Routing-Protokolle, die denen in normalen Netzwerken ähnlich sind. Dabei wird ein zu versendendes Paket über die gleiche zuvor ausgewählte Sequenz von Knoten versendet. Diese Seminararbeit stellt das Protokoll ExOR (Extreme Opportunistic Routing) vor, welches den Vorteil der Broadcast-Übertragung in drahtlosen Netzwerken nutzt, indem es die Pakete an mehrere Knoten gleichzeitig sendet, welche die Pakete dann weiterleiten können. Wenn ein Paket nicht von einem „bevorzugten“ Knoten übertragen werden kann, so kann der Empfängerknoten das Paket dennoch von einem anderen Knoten aus empfangen. Dadurch kann der Durchsatz gegenüber traditionellen Protokollen um mehr als das Doppelte gesteigert werden, da traditionelle Protokolle den Vorteil der Broadcast-Übertragung nicht nutzen und, im Falle eines Paketverlustes, wieder über die selbe Sequenz von Knoten senden. Ist die Qualität der Links zwischen den Knoten nicht mehr gut genug oder existieren Links nicht mehr, so können traditionelle Protokolle erst nach einem Update der Routing-Tabelle fortfahren, wogegen ExOR noch die Möglichkeit hat, Pakete über alternative Routen zu übertragen.

1. Einleitung

Das ExOR-Protokoll wurde am M.I.T. Computer Science and Artificial Intelligence Laboratory von Sanjit Biswas und Robert Morris entwickelt und im August 2005 auf der SIGCOMM'05 in Philadelphia vorgestellt [1].

Die meisten traditionellen Protokolle gehen in drahtlosen Netzwerken von reinen Punkt-zu-Punkt Verbindungen innerhalb des Netzwerkes aus, wie sie in normalen Netzwerken üblich sind. Wie in Abbildung 1a zu sehen, sind zwei Netzwerkknoten dabei über ein Netzwerkkabel miteinander verbunden. Tatsächlich sind innerhalb eines drahtlosen Netzwerkes alle Netzwerkknoten innerhalb ihrer Funkreichweite (Nachbarschaft) miteinander verbunden. Abbildung 1b zeigt ein drahtloses Netzwerk, wobei die gestrichelten Kreise die Funkreichweite angeben. So werden gesendete Pakete eines Quellknotens in drahtlosen Netzwerken von allen anderen Netzwerkknoten in der Nachbarschaft gleichzeitig empfangen und werden ggf. von den Knoten wieder verworfen, welche nicht als Empfänger angegeben waren. Sendet Knoten B ein Paket an Knoten D, so muss das Paket im normalen Netzwerk über den Knoten A weitergeleitet werden. Im drahtlosen Netzwerk kann Knoten D das Paket sofort empfangen, da sich der Knoten D innerhalb der Funkreichweite von Knoten B befindet. Die Knoten A und C empfangen die Pakete von Knoten B ebenfalls sofort. Sie werfen die Pakete aber sofort, nachdem sie festgestellt haben, dass sie nicht als Empfänger vorgesehen sind.

ExOR nutzt, die in drahtlosen Netzwerken von Hause aus gegebene, Broadcast-Übertragung zu seinem Vorteil. Zwischen jedem Paar von Knoten existiert ein Link, obgleich die Fehler-Rate zwischen den Knoten hoch sein mag. Jedes

Paket kann potentiell von jedem Knoten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit Größer Null empfangen werden.

ExOR ist ein opportunistisches Routing-Protokoll für drahtlose Netzwerke, welches auf Standardhardware – wie 802.11 Netzwerkkarten – ausführbar ist. Im Gegensatz zu deterministischen Protokollen, bei denen vor dem Versenden die Route bestimmt wird, wird bei opportunistischen Protokollen die Route nicht im Vorfeld geplant. Die Route zum Zielknoten ist damit nicht vorher festgelegt und kann zur Laufzeit variieren. Damit können opportunistische Ansätze einen Vorteil aus zufälligen und seltenen Gelegenheiten ziehen, die sich ergeben, wenn zum Beispiel ein Paket in erster Instanz besonders weit gesendet werden kann. Sie können Links mit geringerer Übertragungswahrscheinlichkeit nutzen und sich besser an Kanal-Schwankungen anpassen [4].

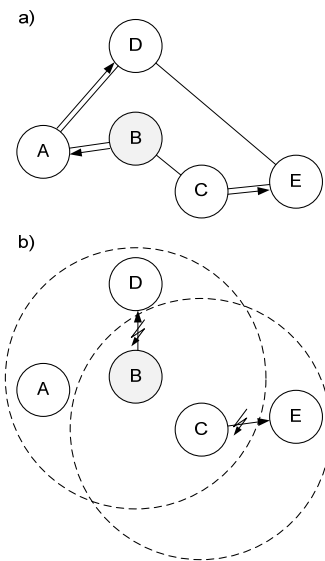


Abbildung 1: Normales und drahtloses Netzwerk.

Die Herausforderung in beiden Ansätzen ist, das Protokoll so zu entwerfen, dass es nicht zu Kollisionen kommt, weil mehrere Knoten zugleich senden möchten. In drahtlosen Netzwerken müssen sich alle Knoten, im Gegensatz zu normalen Netzwerken, ein Übertragungsmedium teilen, wodurch die Anzahl der möglichen Kollisionen mit der Anzahl der Knoten in der Nachbarschaft drastisch steigt. Sendet man über mehrere Knoten gleichzeitig, so steigt auch der Aufwand den man betreiben muss um zu entscheiden, welcher Knoten zur welcher Zeit das Paket weiterleiten darf. Sendet zum Beispiel Knoten B ein Paket an Knoten D, und Knoten C möchte ein Paket an Knoten E senden kommt es im drahtlosem Netzwerk zur Kollision am Knoten B und C, wogegen die Übertragung im normalen Netzwerk nicht zur Kollision führt. Es muss nun entschieden werden, welcher Knoten zuerst senden darf, damit es nicht zur Kollision kommt. Zudem steigt bei opportunistischen Protokollen der Speicherbedarf auf den einzelnen Knoten, da diese die Pakete puffern müssen. Der Aufwand spielt vor allem in Sensornetzwerken eine große

Rolle, da die Ressourcen wie Energie, Speicher und Rechenleistung begrenzt sind.

Die Schlüsselherausforderung bei der Verwirklichung von ExOR ist sicherzustellen, dass nur der „geeignetste“ Knoten für die Weiterleitung ausgewählt wird, um zu verhindern, dass Pakete mehrfach zum Zielknoten gesendet werden. Um die Kosten der Kommunikation für die Einigung der Knoten zu minimieren, arbeitet ExOR mit Batches (Stapeln) von Paketen. Der Quellknoten fügt jedem Paket eine Liste von möglichen Knoten zur Weiterleitung ein, welche nach Priorität geordnet ist. Die Priorität ergibt sich aus dem Abstand zum Zielknoten. Alle Nachbarknoten empfangen die Pakete, wobei der Knoten mit der höchsten Priorität das Paket weiterleitet. Wurde das Paket nach einer bestimmten Zeit nicht weitergeleitet, wird es von dem Knoten mit der nächst kleineren Priorität weitergeleitet, usw. Es werden nur Pakete weitergeleitet, die noch nicht von höher priorisierten Knoten bestätigt worden sind. Sind 90% der Pakete vom Quellknoten erfolgreich empfangen worden, werden die restlichen 10% der Pakete über traditionelles Routing übertragen.

Die Seminararbeit ist wie folgt aufgebaut. Kapitel 2 beschreibt die Funktionsweise von ExOR. Kapitel 3 stellt die Messergebnisse vor. In Kapitel 4 werden die Messergebnisse anhand von Messergebnissen anderer Arbeiten hinterfragt. Weitere Arbeiten zu opportunistischen Ansätzen werden in Kapitel 5 vorgestellt. Kapitel 6 fasst die Seminararbeit zusammen.

2. Funktionsweise von ExOR

In diesem Kapitel wird die Funktionsweise von ExOR in verschiedenen Abschnitten vorgestellt.

Grundidee

Möchte ein Knoten ein Paket an einen anderen Knoten versenden, so beginnt dieser das Paket via Broadcast an alle Knoten in seiner Nachbarschaft zu senden. Eine Untermenge aus den Nachbarknoten empfängt das Paket. Die Knoten entdecken und einigen sich über ein Agreement-Protokoll, welche Knoten zu dieser Untermenge von Nachbarknoten gehören. Der Knoten, welcher dem Zielknoten am nächsten ist, sendet das Paket via Broadcast weiter. Das Agreement-Protokoll ist im Wesentlichen die Erzeugung der Liste von möglichen Kandidaten zur Weiterleitung der Pakete, welche im Abschnitt Forward List beschrieben ist.

Der Vorteil gegenüber traditionellen Protokollen – welche immer die selbe Sequenz von Knoten zum Senden von Paketen nutzen – liegt darin, dass ExOR von zufällig guten Links zwischen zwei sehr weit auseinander liegenden Knoten profitieren kann, sowie auch bei zufällig schlechten Links zwischen zwei weniger weit entfernten Knoten. Betrachten wir Abbildung 2. Nehmen wir an, dass traditionelle Protokolle Pakete vom Quellknoten über die Knoten B und D an das Zielknoten senden. In der Abbildung stellen die oberen Pfeile die Hops der traditionellen Protokolle dar, die unteren die von ExOR. Der gestrichelte Halbbogen zwischen Knoten D und E gibt an, bis zu welcher

Reichweite das Paket erfolgreich, zum Sendezeitpunkt via Broadcast, hätte empfangen werden können. Ist die Übertragungsqualität zum Sendezeitpunkt zwischen dem Quellknoten und Knoten D zufällig sehr gut (a), so erreicht das Paket eventuell bereits beim ersten Senden schon den Knoten D. ExOR spart eine Übertragung gegenüber den traditionellen Protokollen, da diese den Vorteil nicht nutzen und das Paket weiterhin strikt nach Routingtabelle über Knoten B und D senden. Das Paket würde also bei traditionellen Protokollen zunächst vom Knoten D verworfen werden, da Knoten B als Empfänger-Adresse für diesen Hop angegeben ist. Wenn die Übertragungsqualität zum Sendezeitpunkt hingegen schlecht ist (b), die Übertragung an Knoten B fehl schlägt und Knoten A bereits das Paket erfolgreich empfangen hat, so kann ExOR im nächsten Schritt das Paket direkt von Knoten A aus weiterleiten, wogegen die traditionellen Protokolle wieder vom Quellknoten beginnen.

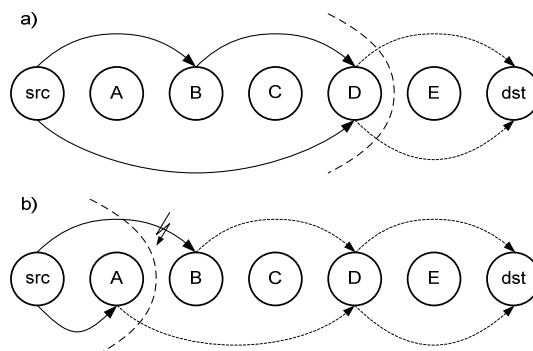


Abbildung 2: Beispielanordnung bei der die gesendeten Pakete über mehrere Routen zum Zielknoten gelangen können.

In Abbildung 3 liegen zwischen Quell- und Zielknoten mehrere Knoten in unmittelbarer Nachbarschaft. Ein Paket kann über mehrere voneinander unabhängige Wege übertragen werden, wodurch die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung steigt. Nehmen wir an die traditionellen Protokolle senden ihr Paket über den Knoten 1. Ist die Übertragungswahrscheinlichkeit der Links vom Quellknoten zu den Knoten 1 bis 100 gering, kann ExOR hier von einer „glücklich“ erfolgreichen Übertragung an einen der Zwischenknoten gegenüber traditionellen Protokollen profitieren, da diese immer wieder den gleichen Knoten wählen, und somit die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Übertragung geringer ist.

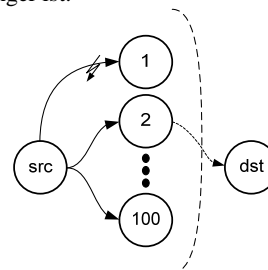


Abbildung 3: Beispielanordnung bei der die gesendeten Pakete über verschiedene Knoten zum Zielknoten gelangen können.

Design

Das ExOR-Protokoll wurde nach folgenden Kriterien entwickelt. Das Agreement-Protokoll darf nur einen kleinen Overhead haben, da sonst der Vorteil des erhöhten Durchsatzes verloren geht. Der Knoten der dem Zielknoten am „nächsten“ liegt soll auch der Knoten sein, welcher das Paket weiterleitet. Nur dadurch kann ExOR profitieren. Deshalb benötigt ExOR ein Bewertungsmaß für die Kosten einer Übertragung. Je Größer und dichter das Netzwerk ist, desto mehr steigen die Kosten vom Agreement-Protokoll. Um diese Kosten gering zu halten, muss ExOR die „nützlichsten“ Knoten als Kandidaten auswählen können. Um die Anzahl der Kollisionen während der Übertragung zu minimieren, muss ExOR verhindern, dass mehrere Knoten gleichzeitig senden.

ExOR sammelt alle zu sendende Pakete in einen Batch (Stapel) und versendet mit jedem Paket eine Liste von Knoten, welche das Paket weiterleiten könnten (Forwarder List). Jedem Knoten ist eine Priorität zugeordnet, je nachdem wie hoch die geschätzten Gesamtkosten der Übertragung bis zum Zielknoten sind. Je geringer der Abstand, bzw. die Kosten zum Zielknoten, desto höher ist die Priorität. Jeder Knoten puffert erfolgreich empfangende Pakete. Der Knoten mit der höchsten Priorität leitet das Paket weiter. Die Menge von Paketen, die Teil eines Batches sind, heißen Fragment vom Batch.

In einer sogenannten Batch Map wird eingetragen, welche Pakete aus den entsprechenden Batch bereits empfangen worden sind. Jedes Paket enthält eine Kopie der Batch Map des Senders. Anhand der Batch Map kann der Knoten erkennen, welche Knoten bereits welche Pakete des Batches empfangen haben. Die anderen Knoten leiten in der Reihenfolge, gemäß ihrer Position in der Forwarder List, ihre Pakete weiter, die nicht von höher priorisierten Knoten bereits empfangen und bestätigt worden sind. Die Knoten fahren so lange mit dem Protokoll fort, bis 90% der Pakete vom Zielknoten empfangen worden sind. Die restlichen Pakete werden mit traditionellen Routing-Protokollen übertragen.

Knotenzustand

Für jeden Batch von Paketen an dem ein Knoten beteiligt ist, verwaltet dieser einen Zustand. Damit beginnt er, sobald er ein Paket empfängt.

Der *packet buffer* speichert die erfolgreich empfangenen Pakete im aktuellen Batch. Damit können auch Knoten mit niedriger Priorität notfalls das Paket nach einer gewissen Zeit weiterleiten.

Die *local forwarder list* enthält eine Kopie von der priorisierten Forwarder List von einem der empfangenen Pakete im Packet Buffer. Alle Knoten verwenden für einen Batch die gleiche Liste von Kandidaten, welche vom Quellknoten mit Hilfe von Bewertungskriterien erzeugt worden ist.

Der *forwarding timer* gibt die Zeit an, an dem der Knoten die Pakete aus seinem Packet Buffer weiterleitet. Der Timer wird so gesetzt, dass andere Knoten mit höherer Priorität genug Zeit haben ihre Pakete zu senden und wird aktualisiert, sobald der Knoten mitbekommt dass ein anderer Knoten ein

Paket sendet. Der Timer soll das gleichzeitige Senden und somit Kollisionen verhindern.

Der *transmission tracker* zeichnet die Senderate von den anderen Knoten auf, zusammen mit der erwarteten Anzahl von Paketen. Er wird benutzt, um den Forwarding Timer zu setzen. Eine geringere Senderate bedeutet eine längere Wartezeit für alle Knoten.

Die *batch map* gibt für jedes Paket innerhalb eines Batches an, welcher Knoten mit höchster Priorität bereits eine Kopie des Paketes besitzt. Sie wird von allen sendenden Knoten aktualisiert und mit den nächsten Paket versendet. Damit wird sichergestellt, dass Knoten mit niedriger Priorität das Paket nicht ohne weiteres weiterleiten. Im Abschnitt Batch-Vorbereitung und Paket-Empfang wird beschrieben, wie die Batch Map aktualisiert und weitergereicht wird, und welchen nutzen ExOR daraus zieht.

Paket-Format

Das ExOR-Paket wird innerhalb eines Ethernetframes versendet. Direkt hinter dem Ethernet-Header beginnt das ExOR-Paket mit seinem Header sowie den Paketdaten (Abbildung 4). Alle Pakete von ExOR sind Broadcast-Pakete. Im ExOR-Header ist die Version von ExOR (Ver), die Länge des Headers (HdrLen), die Länge der Daten (PayloadLen), die ID des Batches (Batch ID), die Paketnummer (PktNum), die Größe des Batches in Paketen (BatchSz), die Größe des Fragments des aktuell sendenden Knoten in Paketen (FragSz) und der Offset des aktuellen Paketes innerhalb des Fragments (FragNum). Zusätzlich ist im Header die Größe der Forwarder List (FwdListSize), der Offset den aktuell sendenden Knoten innerhalb der Forwarder List (ForwarderNum), eine Kopie der Forwarder List des Quellknotens (Forwarder List), in der die Quellknoten und der Zielknoten spezifiziert sind, einer Kopie der Batch Map des aktuell sendenden Knoten (Batch Map). Die Batch Map beinhaltet, anstatt vollständiger IP-Adressen der Knoten, Verweise auf die Einträge der Forwarder List in der die beteiligten Knoten aufgeführt sind. Wodurch Platz gespart wird.

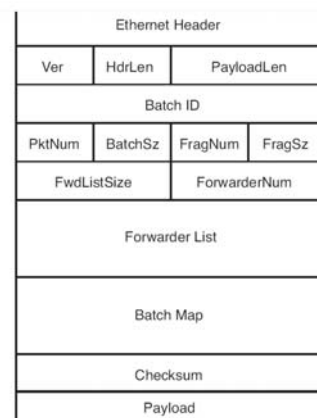


Abbildung 4: ExOR Header-Format

Batch-Vorbereitung

Der Quellknoten sammelt alle Pakete mit dem gleichen Adressaten in einem Batch. Dann vergibt er eine eindeutige Batch ID und wählt eine Liste von Knoten aus, über die der Batch zum Zielknoten versendet werden soll. Jedem Paket wird der ExOR-Header am Anfang angesetzt, welcher bereits die Batch ID, sowie der Forwarder List enthält. Die Batch Map gibt an, dass nur der Quellknoten die Pakete empfangen hat. Der Quellknoten gibt außerdem im BatchSz- und FragSz-Feld an, wie viele Pakete er versenden wird. Nun sind die Pakete bereit zum Versand und der Quellknoten beginnt zu senden.

Forwarder List

Die Forwarder List wird vom Quellknoten anhand der geschätzten Kosten zum Zielknoten erstellt. Die einzelnen Knoten werden je nach Höhe der Übertragungskosten in die Liste einsortiert. Je geringer die Kosten, desto höher die Priorität. Als Bewertungsmaß für die Kosten wird die Anzahl der benötigten Übertragungen sowie der Hops über die Route genommen, über jene die üblichen Routing-Protokolle ihre Pakete versenden. Das Bewertungsmaß ist dem ETX (expected transmission count metric) [3] ähnlich, wobei ExOR nur die Übertragungswahrscheinlichkeit in Richtung des Zielknotens verwendet. ExOR nutzt für die Berechnung der ETX-Werte das komplette Wissen über die Verlust-Raten zwischen den Knoten.

Wenn die Anzahl der Knoten im Netzwerk zu hoch ist, dann ist die erwartete Anzahl der für die Weiterleitung der Pakete zuständigen Knoten zu gering. In diesem Fall würden die Kosten für das Agreement-Protokoll und dem Scheduling-Protokoll zu groß sein, da diese mit der Anzahl der Knoten zusammenhängen. Aus diesem Grund nimmt ExOR nur einen Teil der verfügbaren Knoten in die Forwarder List auf. Dazu führt der Quellknoten eine Simulation von ExOR auf Basis der ihm zur Verfügung stehende Verlust-Raten durch, und wählt die Knoten aus, welche mindestens 10% eines Batches übertragen. Fehlerhafte Messungen der Verlust-Raten können die Leistungsfähigkeit einschränken, da dies zu einer fehlerhaften Forwarder List führen kann, in der die Knoten falsche Prioritäten haben oder gar nicht erst in der Liste aufgenommen bzw. ausgeschlossen werden. Trotzdem ist ExOR noch weiterhin in der Lage die Pakete zuzustellen.

Paket-Empfang

Ein Knoten prüft den Header von jedem erfolgreich empfangenen Paket. Wenn der Knoten in der Forwarder List des gerade empfangenen Paketes steht, fügt er das Paket dem Packet Buffer des dazugehörigen Batches zu. Der Knoten vergleicht jeden Eintrag der Batch Map des Paketes mit dem jeweiligen Eintrag der lokalen Batch Map. Wenn es in der Batch Map vom gerade empfangenen Paket einen Eintrag mit höherer Priorität gibt, wird der lokale Eintrag durch diesen ersetzt. Jetzt weiß der Knoten, dass es einen anderen Knoten gibt, der geeigneter ist das Paket weiterzuleiten. Mit Hilfe diesen Aktualisierungs-Algorithmus und dem Versenden der Batch Map mit jedem Paket haben alle Knoten annähernd die gleiche Batch Map.

Die Batch Map der Pakete verhalten sich wie ein Gossip-Mechanismus, bei dem die Informationen über empfangene Pakete von höher priorisierten Knoten an nieder priorisierte Knoten übermittelt werden. Daraus folgt, dass es unwahrscheinlich ist, dass ein nieder priorisierter Knoten, Pakete, die bereits von höher priorisierten Knoten empfangen wurden, weitergeleitet werden.

Scheduling

ExOR versucht die Zeiten zum Senden so einzuteilen, dass nur ein Knoten zur gleichen Zeit sendet. Die Planung erlaubt höher priorisierte Knoten als erstes ihre Pakete zu senden, was die Beendigung der Übertragung beschleunigt, sowie dafür sorgt, dass alle nieder priorisierten Knoten eine aktuelle Batch Map besitzen. Zudem hilft die Zeitplanung Kollisionen zu vermeiden, was vor allem wichtig ist, da ExOR marginale Links benutzt wo Carrier Sense häufig nicht funktioniert. Mit Carrier Sense horcht ein Knoten, ob ein anderer Knoten gerade sendet. Sobald das Medium frei ist, kann der Knoten senden. Da im drahtlosen Netzwerken die Empfängerknoten auch von anderen Knoten, die außerhalb der Funk-Reichweite des Sendeknotens liegen, gestört werden können, kann die Übertragung trotz Carrier Sense gestört werden.

Deshalb wartet jeder Knoten auf seinen Zeitpunkt zum senden: Nachdem der Quellknoten seinen ganzen Batch geschickt hat, sendet der Zielknoten Pakete, die nur noch die Batch Map enthalten. Anschließend senden die anderen Knoten aus der Forwarder List in der Reihenfolge wie sie in der Forwarder List geordnet sind, angefangen mit der höchsten Priorität. Ein Knoten kann sich nicht sicher sein, ob er die letzte Übertragung des direkt in der Reihenfolge vor ihm liegenden Knoten empfangen hat. Stattdessen sendet der Knoten zu dem Zeitpunkt an den er annimmt, dass das vorige Fragment beendet ist. Der Knoten nimmt dies an, sobald der Forwarding Timer abgelaufen ist.

Immer wenn der Knoten ein Paket empfängt, aktualisiert er den Transmission Tracker. Der Empfänger merkt sich die zuletzt empfangene Fragment-Nummer, was ihn erlaubt zu berechnen, wie viele Pakete seit dem letzten Paket gesendet worden sind. Diese Anzahl, geteilt durch die vergangene Zeit des letzten Empfangs, ergibt die aktuelle Übertragungsrate.

Der Knoten setzt den Forwarding Timer auf die aktuelle Zeit plus die geschätzte Zeit aus der Senderate multipliziert mit der Anzahl der noch zu sendenden Pakete. Der Knoten bestimmt die Anzahl der noch verbleibenden Pakete aus dem Fragment-Feldern, indem er die Größe des Fragments mit der Anzahl der empfangenden Pakete vergleicht.

Konkurrierende Übertragungen anderer Protokolle oder Batches können mit der gleichen Fairness übertragen werden, wie vom IEEE 802.11 MAC (Media Access Controller) vorgesehen ist. Das heißt, ExOR hindert andere Protokolle nicht an ihrer Ausführung indem es stetig das Medium belegt. Der Transmission Tracker passt sich den erhöhten Datenverkehr an, weil es eine verzögerte Übertragungsrate von den gerade weiterleitenden Knoten beobachtet. Sendet zum Beispiel ein nicht am ExOR beteiligter Knoten Pakete, steigt die Anzahl der Kollisionen mit ExOR-Paketen. ExOR kann seine Pakete demnach auch nicht an seine Knoten weiterleiten, wodurch die Übertragungsrate von ExOR sinkt.

Der Transmission Tracker erkennt die geringere Übertragungsrates und der Transmission Timer wird in der Folge höher gesetzt. Da jetzt alle ExOR-Pakete mit einer geringeren Senderate versendet werden, bleibt mehr Zeit für die „fremden“ Knoten ihre Pakete zu senden, wodurch die Anzahl der Kollisionen wieder reduziert wird, und somit die Fairness gewährleistet ist.

Wenn ein Knoten von den höher priorisierten Knoten noch keine von seinen weiterzuleitenden Pakete gehört hat, dadurch auch keine Information in seiner Batch Map hat, geht er davon aus, dass ein höher priorisierter innerhalb einer Zeit von fünf Paket-Durchläufen diese Pakete sendet.

Ist der Forwarding Timer abgelaufen, sendet der Knoten sein Fragment vom Batch: Alle Pakete aus dem Batch, welche von den Knoten, aber nicht bereits von höher Priorisierten Knoten, empfangen worden sind. Ein Sonderfall liegt vor, wenn der Forwarding Timer des Zielknotens abgelaufen ist. Der Zielknoten sendet dann zehn Mal seine Batch Map ohne Daten. Damit wird jetzt jeder Knoten darüber informiert, welche Pakete der Zielknoten empfangen hat.

Wenn der am niedrigsten priorisierte Knoten alle seine Pakete weitergeleitet hat, startet das Scheduling von vorn. Der Quellknoten sendet alle Pakete, für die in der Batch Map noch keine Empfänger eingetragen sind, wiederholt an den Zielknoten. Der Zielknoten sendet eine Kopie von seiner Batch Map, und alle Knoten in der Forwarder List senden jedes Paket, welches noch nicht von einem höher priorisierten Knoten empfangen worden ist. Damit senden alle Knoten erneut die Pakete die nicht vom Zielknoten empfangen worden sind.

Vervollständigung der Übertragung

Wenn eine Batch Map angibt, dass über 90% der Pakete dieses Batches von einem höher priorisierten Knoten erfolgreich empfangen worden sind, werden keine Pakete vom Knoten versendet, wenn der Sendezeitpunkt gekommen ist. Die letzten wenigen Pakete eines Batches haben die höchsten Kosten beim senden. Wenn außerdem die Anzahl der zu Pakete klein ist, ist die Wahrscheinlichkeit größer, das die Knoten ihren Forwarding Timer falsch setzen und es zu Kollisionen kommt.

Weil ExOR nur garantiert, 90% der Pakete zu zustellen, werden die restlichen Pakete vom Zielknoten über die traditionellen Protokolle angefordert. Der Zielknoten sendet dazu seine Batch Map an den Quellknoten, welcher dann die verbleibenden Pakete mit den traditionellen Protokollen sendet, die Link-Level ACKs verwenden, um die Pakete zuverlässig zu übertragen.

Der Quellknoten beginnt mit der Übertragung von einem neuem Batch sobald die Batch Map vom aktuellen Batch zu 90% mit Einträgen von höher priorisierten Knoten gefüllt ist. Der Quellknoten wartet so lange bis er keine Pakete mehr vom aktuellen Batch hört.

3. Messergebnisse und Evaluierung

Die Evaluierung wurde auf dem Roofnet am M.I.T. Computer Science and Artificial Laboratory in Cambridge Massachusetts durchgeführt. Das Roofnet ist ein drahtloses Netzwerk welches aus 38 Knoten besteht, die auf knapp sechs Quadratkilometer verteilt sind. Alle Knoten bestehen aus einem PC mit einer 802.11b WLAN-Karte die mit Antennen auf den Dächern der Gebäude, zum Teil auch in Fenstern angebrachten Antennen, verbunden sind.

Bei der Evaluierung wurde der Datendurchsatz zwischen 65 zufällig ausgewählten Knotenpaaren gemessen. Während der Messung wurde das Roofnet-Netzwerk vom Roofnet-Routing und anderen Nutzern verwendet. Der gesendete Batch hatte eine Größe von 100 Paketen, wobei jedes Paket 1024 Byte Daten sowie eine Headergröße von 24-48 Bytes (Header üblicher Protokolle) und 44-114 Bytes (ExOR Header, abhängig von der Größe der Forwarder List) besaß. Die Pakete wurden mit einer 802.11b Bitrate von einem Megabit/Sekunde versendet. Um den Effekt von Interferenzen durch andere Nutzer und anderen Quellen in den Messungen zu mindern, wurde für das Gesamtergebnis der Mittelwert von neun Durchläufen genommen.

Der Vorteil vom ExOR-Protokoll variiert mit der Anzahl der Knoten zwischen dem Quellknoten und dem Zielknoten. Abbildung 5 zeigt den Durchsatz der 25 Knotenpaare mit dem höchsten Durchsatz. Selbst wenn ExOR die Pakete direkt vom Quellknoten zum Zielknoten gesendet werden, hat ExOR einen größeren Durchsatz. Das liegt daran, dass übliche Protokolle für jedes Paket ein ACK erwarten und Paket jedes Mal neu senden müssen, wenn diese ACKs verloren gehen. Der Zielknoten sendet bei ExOR dagegen die Batch Map zehn mal, so dass es unwahrscheinlich ist, dass der Quellknoten Pakete unnötig erneut gesendet werden muss. Unter anderem werden in manchen Fällen Pakete von anderen Knoten mit geringerer Verlustrate als der Quellknoten an den Zielknoten weitergeleitet. Bei mehr als einen Hop profitiert ExOR von einer größeren Auswahl an Knoten in der Forwarder List, so dass die Pakete über mehrere Knoten zum Zielknoten weitergeleitet werden können. Im Falle eines Paketverlustes können die Pakete noch über die anderen Knoten erfolgreich übertragen werden. Zusätzlich kann die Batch Map auch auf mehreren Wegen im Gossip-Prinzip zum Quellknoten gelangen, so dass unnötige Wiederholungen ausbleiben.

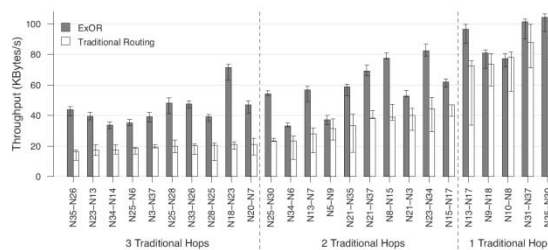


Abbildung 5: Vergleich des Durchsatzes von üblichen Protokollen gegenüber ExOR. ExOR steigert den Durchsatz besser, je mehr Hops zwischen Quell- und Zielknoten liegen.

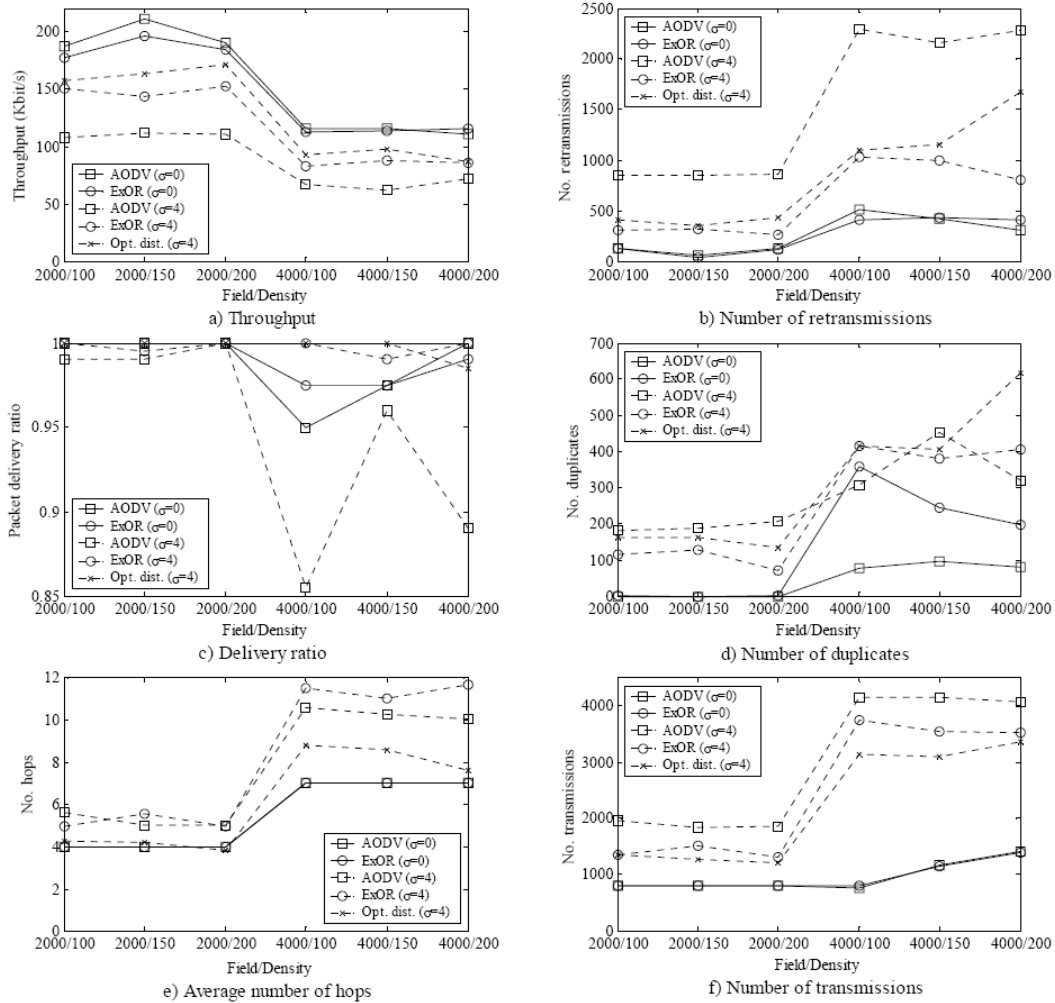


Abbildung 6: AODV und ExOR in freiem Raum ($\sigma=0$) und mit Abschattung ($\sigma=4$).

Es wurden noch weitere Messungen mit anderen Knotenpaaren durchgeführt, bei denen mehr als drei Hops zwischen Quell- und Zielknoten lagen. Der Durchsatz von ExOR steigert sich mit der Anzahl der Hops. Alle Messergebnisse können im Paper [1] selbst nachgelesen werden.

4. Weitere Messergebnisse und Deutung

Wie die Messergebnisse von ExOR zeigen, kann mit Hilfe von ExOR der Durchsatz um das zwei- bis vierfache gegenüber traditioneller Routingansätze gesteigert werden. Dies gilt hier allerdings nur für statische Netzwerke wie das Roofnet, welches ein statisches Ad-hoc-Netzwerk ist. Andere Untersuchungen [4] zeigen, dass ExOR in mobilen Netzwerken deterministischen Ansätzen mit Qualitätsüberwachung und hochfrequenten Updates der Routen unterlegen ist.

Simulationen haben gezeigt [5], dass auch in statischen Netzwerken ExOR dem AODV [6] in freien Räumen unterlegen, bei Abschattung (wie in realen drahtlosen Netzwerken) dennoch überlegen ist. Die Simulation wurde auf einem Gitter mit einer horizontalen Abmessung von 2000m und 4000m und einer konstanten vertikalen Abmessung von 300m durchgeführt. Die Knoten wurden dabei in einen festen Abstand von 75m in vertikaler Richtung platziert. Der horizontale Abstand wurde zwischen 100m, 150m und 200m variiert. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse dieser Simulationen. Abbildung 6a zeigt, dass im freien Raum der Durchsatz von AODV etwas besser ist im Vergleich zu ExOR. Aufgrund der Verteilung der Übertragungswahrscheinlichkeit in diesem einfachen Verteilungsmodell kann ExOR keine Vorteile nutzen. ExOR verhält sich wie AODV, allerdings mit einem höheren Aufwand sich zu einigen. Bei Abschattung sinkt der Durchsatz bei beiden Protokollen, wobei ExOR jetzt AODV um ca. 30% überlegen ist. Die Selektion der Kandidaten aufgrund der Entfernung steigert den Durchsatz von ExOR um 40% gegenüber AODV.

Abbildung 6b und f zeigt, dass bei Abschattung die Anzahl der Übertragungen und wiederholten Übertragungen auf dem Link-Layer bei ExOR deutlich kleiner ist als die von AODV. In freien Raum sind die Unterschiede vernachlässigbar klein. ExOR hat auch eine höhere Übertragungswahrscheinlichkeit als AODV, wie man in Abbildung 6c sehen kann. Eine weitere Beobachtung ist, dass die Anzahl der Duplikate speziell bei den größeren Gittern größer ist. Dies ist darauf zurückzuführen, dass es bei ExOR potentiell mehr Knoten gibt, die keine Acknowledgements erhalten und deshalb fälschlicher Weise das Paket erneut senden. ExOR benötigt auch mehr Hops als AODV. Bei Abschattung müssen beide Protokolle mehr Hops verwenden, wobei ExOR deutlich mehr Hops benötigt als AODV.

Wie die Simulation gezeigt hat, kann ExOR vor allem bei Abschattung einen Vorteil gegenüber AODV ziehen. Die Simulation wurde mit einer von der Humboldt Universität selbst implementierten Version von ExOR durchgeführt, da der Quell-Code für ExOR nicht mehr frei verfügbar ist. Entscheidend für die Leistungsfähigkeit von ExOR ist die Wahl der Kandidaten zur Weiterleitung der Pakete.

5. Ähnliche Arbeiten

An der Humboldt Universität Berlin geht man mit MCEXOR [5] einen Schritt weiter, indem man den Ansatz von ExOR auf die Benutzung mehrerer Kanäle fortführt. Der IEEE-Standard 802.11 unterstützt mehrere nicht überlappende Funk-Kanäle. Die Humboldt Universität verknüpft den Ansatz des Routing-Protokolls MCRP [7] mit ExOR, um die Vorteile von ExOR auf Geräten mit nur einem Sender-Empfänger nutzen zu können.

6. Zusammenfassung

Diese Seminararbeit stellt das opportunistische Routing-Protokoll ExOR vor, welches die Vorteile der Broadcast-Übertragung nutzt. ExOR kann den Durchsatz in statisch drahtlosen Netzwerken um ein vielfaches erhöhen. Damit stellt ExOR eine Alternative für traditionelle Protokolle in statischen Netzwerken da. Untersuchungen haben gezeigt, dass opportunistische Ansätze wie ExOR in mobilen Netzwerken jedoch in den meisten Fällen den deterministischen Ansätzen unterlegen sind. Um dennoch die Vorteile von opportunistischen Ansätzen zu nutzen, kann ein gemischter Ansatz für mobile Netzwerke sinnvoll sein.

ExOR lässt sich aber auch in statischen Netzwerken weiter verbessern, indem man die Bewertungsmaße für die Erzeugung der Forwarder List verbessert. Außerdem kann man durch einen gemischten Ansatz von Protokollen, welche mehrere Kanäle auf einem Sender-Empfänger nutzen, und ExOR die Leistungsfähigkeit wieder um ein vielfaches steigern.

Zukünftig werden in drahtlosen Netzwerken die opportunistischen Ansätze wahrscheinlich mehr Anklang finden und nach und nach die traditionellen Ansätze ersetzen.

Referenzen

- [1] S. Biswas and R. Morris. *ExOR: Opportunistic Multi-Hop Routing for Wireless Networks*. SIGCOMM'05, August 21-26, 2005
- [2] C. E. Perkins and P. Bhagwat. *Highly Dynamic Destination-Sequenced Distance-Vector Routing (DSDV) for Mobile Computers*. SIGCOMM'94, August, 1994
- [3] D. De Couto, D. Aguayo, J. Bicket and R. Morris. *A High-Throughput Metric for Multi-Hop Wireless Routing*. MobiCom'03, September 14-19, 2003
- [4] J. Kim and S. Bohacek. *A Comparison of Opportunistic and Deterministic Forwarding in Mobile Multihop Wireless Networks*. MobiOpp'07, June 11, 2007
- [5] A. Zubow, M. Kurth and J. Redlich. *Multi-Channel Opportunistic Routing in Multi-Hop Wireless Networks*. Humboldt University Berlin
- [6] C. Perkins, C. E. Perkins. *Ad-hoc on-demand distance vector routing*. MILCOM'97, November, 1997
- [7] J. So N. Vaidya. *A Routing Protocol for Utilizing Multiple Channels in Multi-Hop Wireless Networks with a Single Transceiver*. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2004