Computerworld 13. September 1999 Nr. 37/99 HINTERGRUND S. 26

RA_3DIO – Wellenausbreitung in 3D

von Stephan Eidenbenz, Christoph Stamm und Prof. Dr. Peter Widmayer, Institut für Theoretische Informatik, ETH Zürich

Einleitung und Projektbeschreibung

Seit Beginn der Liberalisierung des europäischen Telekommunikationsmarktes ist die Anzahl der Anbieter von Mobilfunk-Dienstleistungen stark gestiegen. Während ein Teil dieser Anbieter sich auf den bestehenden Mobilfunknetzen einmietet, sehen sich die anderen Anbieter vor das Problem gestellt, ein eigenes Mobilfunknetz aufzubauen. Beim Aufbau eines neuen Netzes geht es in einem ersten Schritt darum, einen möglichst grossen Anteil der Bevölkerung mit möglichst tiefen Netzinfrastrukturkosten zu erreichen. Dies wird normalerweise durch eine Abdeckung der grössten Städte und der dazwischen liegenden Hauptverkehrsachsen erreicht. Erst in einem zweiten Schritt wird versucht, einen möglichst grossen Teil des angestrebten Versorgungsgebietes abzudecken, wobei auch hier wieder eine Minimierung der Netzinfrastrukturkosten im Vordergrund steht. Ein wesentlicher Anteil der Netzinfrastrukturkosten wird durch die Mobilfunkantennen verursacht, die je nach Standort und Bauart bis zu einer halben Million Franken pro Antenne kosten.

Die genaue Bestimmung von guten Antennenstandorten ist eine zeitaufwendige Prozedur. In einem ersten Schritt werden mögliche Antennenstandorte evaluiert. Diese Evaluation basiert entweder auf sehr rechenintensiven Modellen oder auf Kartenstudien, gepaart mit viel Expertenwissen und Erfahrung. In einem zweiten Schritt werden dann nicht selten auf diesen Standorten Probesender angebracht, deren Ausbreitung mittels Messwagen experimentell erfasst und aufgezeichnet und anschliessend in Karten oder geographische Informationssysteme übertragen wird. Dabei müssen verschiedenste Parameter, wie genaue Ausrichtung der Antenne, Frequenz und Sendestärke miteinander in Beziehung gesetzt werden. Anhand dieser Messdaten und Karten werden schliesslich die genauen Antennenparameter gewählt.

Zielsetzung

Das Ziel unseres Projektes ist es, den zuvor beschriebenen Evaluationsprozess in einem virtuellen Geländemodell auf einem einfachen Rechnersystem (Personalcomputer) ablaufen zu lassen. Dazu haben wir ein Computerprogramm (RA_3DIO) geschrieben, welches es uns ermöglicht, grosse Geländepartien in Echtzeit und in genügender Auflösung und Anschaulichkeit zu erkunden (also eine Exploration des Geländes vorzunehmen) und die Ausbreitungsgebiete von interaktiv platzierten Antennen zu untersuchen (also die Wellenausbreitung zu errechnen). Da mehrere Antennen in einer Datenbank verwaltet werden sollen, bieten wir eine einfache Schnittstelle zu einem Antennenverwaltungsprogramm. RA_3DIO geht aber noch weiter: Es hilft, Antennen automatisch so zu platzieren, dass mit möglichst wenigen Antennen der ganze Geländeabschnitt mit ausreichender Signalabdekkung versorgt ist. Gerade diese Optimierungskomponente ist es, die RA_3DIO besonders attraktiv macht: Die automatisch vorgeschlagenen Antennenstandorte können manuell verändert und ergänzt werden, und die Optimierung kann auf den noch nicht versorgten Rest des Geländes beschränkt werden. Die Benutzerin ist dadurch in der Lage, in einem Prozess der „interaktiven Optimierung“ zu einer Lösung zu gelangen, die alle ihre Ansprüche (auch die nicht als Teil des Optimierungsproblems formulierten) bestmöglich erfüllt.

Die Exploration des Geländes

RA_3DIO ist eine Applikation, welche auf einem eigenständigen Programmteil zur Geländeexploration aufbaut. Der Terrain-Explorer ist die Grundkomponente zur Visualisierung und Erkundung von dreidimensionalen Geländedaten. Der Benutzerin stehen dazu eine Vielzahl von Navigationshilfen (Karte, Kompass, automatische Höhenregulierung, Kollisionsüberwachung usw.) zur Verfügung. RA_3DIO unterstützt auch allerlei Geräte für eine echte dreidimensionale Darstellung (z.B. Shutterglasses).

Höhenmodell

Virtuelle Gelände werden durch triangulierte Oberflächen dargestellt, welche selber auf (teils käuflichen, teils frei verfügbaren) Höhenmodellen des natürlichen Terrains basieren. Oft werden solche Höhenmodelle in Matrixform angeboten, indem für jeden Gitterpunkt eines regulären Gitters über dem Gelände die genaue Höhe festgehalten wird. Je näher die Gitterpunkte beieinander liegen, desto genauer ist die Repräsentation des echten Geländes. Gute Geländemodelle verwenden eine Gitterweite (Auflösung) von 25 Metern. Aus den implizit festgehaltenen x- und y-Koordinaten und den explizit erfassten z-Koordinaten (Höhenwerte) ist es möglich, eine triangulierte Oberfläche des Geländes zu berechnen, welche speziellen Gütekriterien Rechnung trägt.

Textur

Zusätzlich zum eigentlichen Höhenmodell verwenden wir zuschaltbare Texturen (z.B. Satellitenbilder, Luftbilder oder Pixelkarten). Diese Texturen sind herkömmliche Bilddateien, die rechnerisch auf die triangulierte Oberfläche projiziert werden. Dadurch erhält die Benutzerin einen realitätsnahen Eindruck des Geländes, abhängig von der Güte der Bilder. Heute werden Luftbilder mit einer Auflösung von weniger als einem Meter pro Bildpunkt zum Kauf angeboten. Durch diese hohe Realitätstreue wird eine gute Orientierung im virtuellen Gelände möglich.

Dynamisches Szenenmanagement

Sehr grosse triangulierte Geländeszenen können meist nicht in einem Hauptspeicher üblicher Grösse untergebracht werden. Dies hat uns dazu veranlasst, Konzepte auszuarbeiten und umzusetzen, welche es ermöglichen, in erster Linie die jeweils relevanten Geländedaten im Hauptspeicher zu halten, während der grosse Rest der Daten in einer Geländedatenbank auf Sekundärspeicher ausgelagert ist. Die Geländedatenbank kann auf einem zentralen Server liegen, welcher für mehrere Benutzer gleichzeitig die Daten zur Verfügung stellt. Bei diesem Konzept muss darauf geachtet werden, dass sich mit der interaktiven Bewegung des Betrachterstandortes auch die Relevanz der Geländedaten ändert und somit eine Nachführung der Hauptspeicherdaten erforderlich wird. Dieses dynamische Szenenmanagement haben wir in RA_3DIO realisiert (Abbildung 1); anders ist ein befriedigendes Reaktionsverhalten eines Explorationsprogrammes für grosse Terrains nicht zu erreichen.

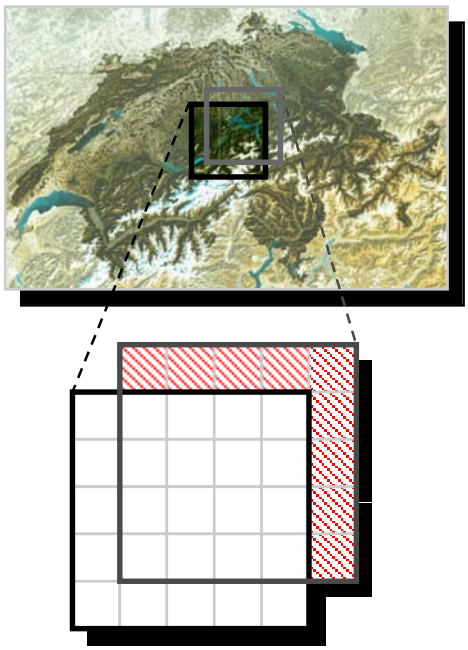

Abb. 1: Bewegt sich die Benutzerin in nordöstlicher Richtung, so bewegt sich auch der sichtbare Geländeausschnitt in gleicher Weise. Die rotschraffierten Bereiche des Terrains werden neu dazu geladen, die weissen Bereiche ausserhalb des roten Quadrates aus dem Hauptspeicher gelöscht.

LOD

Das Konzept der unterschiedlichen Auflösungsstufen (LOD, Level of Detail) ermöglicht es, die Geschwindigkeit der Visualisierung zu erhöhen. Die unterschiedlichen Auflösungsstufen können sowohl bei den Geländedaten als auch bei den Texturen eingesetzt werden (Abbildung 2). Wir nutzen dem Umstand aus, dass bei grossem Abstand zum Gelände die Details des Geländes nicht wahrgenommen werden; das gleiche gilt für das extrem schnelle Durchqueren des Geländes. Somit ist es möglich, diese Details frühzeitig aus der Verarbeitungskette auszuschliessen und damit den Rechner zu entlasten. Damit man dann aber bei Bedarf die noch fehlenden Details zum bisherigen groben Bild hinzunehmen kann, ohne das ganze Bild nochmals übernehmen zu müssen, bedarf es hierarchischer Repräsentationen, sowohl bei der Triangulierung als auch bei Texturen, die ein inkrementelles Verfeinern gestatten. Dies haben wir in RA_3DIO realisiert.

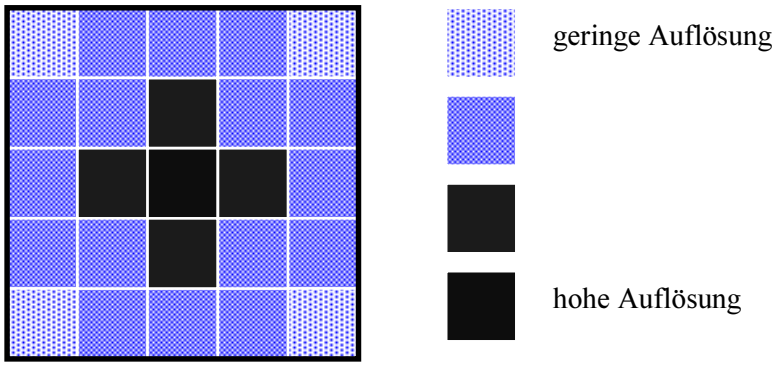

Abb. 2: Die Geländedaten im Hauptspeicher sind in eine Matrix von Patches aufgeteilt. Für jeden Patch kann eine Auflösung bezüglich Betrachterstandort und Überfluggeschwindigkeit gewählt werden.

Wellenausbreitung

Lange Wartezeiten für die Benutzerin sind aber nicht nur bei der Exploration inakzeptabel, sondern auch für die anderen Bereiche des Systems. Für die Berechnung der Wellenausbreitung einer Antenne wollen wir daher mit schnellen Algorithmen eine möglichst gute Vorhersage der Sendeleistung an einem beliebigen Punkt im Gelände ermitteln. Die Güte der Vorhersage hängt dabei wesentlich vom Geländemodell, der Modellierung der Antenne und ihrer Abstrahlcharakteristik und dem benutzten Wellenausbreitungsmodell ab.

Antennencharakteristik

Neben der theoretisch interessanten isotropen Antenne kann RA_3DIO mit beliebigen realen Antennentypen umgehen. Reale Mobilfunkantennen unterscheiden sich durch eine Vielzahl von Parametern, wovon die wichtigsten (Standort, Höhe, Ausrichtung, Trägerfrequenz, Abstrahlcharakteristik usw.) sich einfach modellieren lassen und direkt in die Simulation der Wellenausbreitung einfliessen. Die eigentliche Abstrahlcharakteristik (Horizontal- und Vertikalmuster) einer Antenne muss als diskrete Funktion in Abhängigkeit des Winkels vorliegen. Die meisten Anbieter von Mobilfunkantennen bieten solche Datenreihen an; wir haben entsprechende Schnittstellen zu Herstellerdaten realisiert.

Wellenausbreitungsmodelle

Je nach Frequenzbereich unterliegen elektromagnetische Wellen den unterschiedlichen Einflüssen durch Topologie, Bodenbeschaffenheit, Bebauungsdichte, Wetter, Jahreszeit usw. mehr oder minder stark. So sind zum Beispiel sehr kurzwellige (hochfrequente) Signale viel anfälliger auf Niederschlag als langwellige Signale. Aus diesen Gründen muss ein adäquates Wellenmodell auf den jeweiligen Frequenzbereich gut abgestimmt sein. Mobilfunk wird heute im sogenannten UHF-Band (Ultra High Frequency, 300–3000 MHz) abgewickelt. Die Wellenlänge in diesem Band liegt circa zwischen einem und einem Zehntel Meter. Solche Wellen werden oft als Mikrowellen bezeichnet, gehören aber auch immer noch zu den Radiowellen. Für die Zukunft wird bereits mit noch kurzwelligeren Signalen geplant, da mit einer höheren Frequenz auch die Übertragungskapazität zunehmen kann. Je kurzwelliger die Mikrowellen aber werden, desto ähnlicher werden ihre Eigenschaften dem infraroten und dem sichtbaren Licht. Das heisst, bereits ein schmales Hindernis unterbricht die Sichtverbindung und somit den Empfang zwischen Sender und Empfänger.

Sichtbarkeitsmodell

Basierend auf diesen Überlegungen haben wir verschiedene Ausbreitungsmodelle in RA_3DIO eingebaut. Das konzeptuell einfachste Modell behandelt die elektromagnetischen Wellen wie Lichtstrahlen. Eine Sendeantenne wird als Leuchtturm aufgefasst, wobei die Leuchtstärke gemäss der zugrundeliegenden Abstrahlcharakteristik variiert wird. Für jeden (Dreiecks-Eck-) Punkt im Gelände wird dann registriert, ob er den Leuchtturm sehen kann und falls ja, wie hell er das Licht wahrnimmt. Die Lichtstärke unterliegt dabei der bekannten Freiraumdämpfung von elektromagnetischen Strahlen, welche einerseits von der Distanz zum Leuchtturm und andererseits von der Frequenz abhängt. Sobald die Frequenz etwas kleiner wird und die Lichtwellen zu Mikrowellen anwachsen, treten an Bergkanten Beugungseffekte auf: Ein Strahl, welcher die Bergkante streift, wird zum Berg hin gebogen. Dadurch ist es möglich, ein Signal an einem Punkt zu empfangen, der den Leuchtturm nicht sieht. Mit zunehmender Wellenlänge treten aber auch (zum Teil hilfreiche und zum Teil störende) Reflexionen am Gelände auf. Diese Reflexionen werden in diesem einfachsten Modell, welches vor allem für kurze Mikrowellen gedacht ist, noch nicht berücksichtigt.

Okumura/Hata-Modell

Ein anderes Ausbreitungsmodell basiert auf empirischen Signalmessungen von Okumura aus dem Jahr 1968. Hata entwickelte aufgrund dieser Messungen 1980 eine Formel für die Wellenausbreitung. In dieser Formel gehen nicht nur die üblichen Ausbreitungsparameter wie Distanz und Frequenz ein, sondern auch Parameter, welche den Geländetyp (offen, leicht bebaut, bebaut) und den Städtetyp (klein, mittel, gross) angeben. Diese zusätzlichen Parameter werden dazu benutzt, die vielschichtigen Signalstreuungen näherungsweise zu beschreiben, welche durch Reflexionen, Beugung und andere Effekte auftreten können. Dieses Modell ist gemäss der ITU (International Telecommunication Union) für den UHF-Bereich geeignet. Da es aber für vorwiegend flache Gegenden entwickelt wurde, ist sein Einsatz in der stark kupierten Schweiz limitiert.

Kombimodell

Wenn wir die beiden zuvor genannten Ausbreitungsmodelle miteinander kombinieren, so erhalten wir ein Modell, welches einerseits mit hügeligem Gelände und andererseits mit den unterschiedlichen Signalstreuungen, hervorgerufen durch Bebauung, umgehen kann. Der Vorteil dieses Modells gegenüber weit komplizierteren Modellen liegt darin, dass die Berechnung der Sendestärke für einen bestimmten Geländepunkt schnell möglich ist. Zu diesem Zweck haben wir Algorithmen entwickelt, welche die Sichtbarkeit im Gelände sehr effizient berechnen können. Dadurch ist die RA_3DIO-Benutzerin in der komfortablen Lage, Antennen interaktiv ins Gelände platzieren und deren unmittelbare Ausbreitung und Abdeckung ohne Wartezeit am Rechner beobachten zu können. Alle wesentlichen Antennenparameter können jederzeit verändert und in ihrer Auswirkung auf die Wellenausbreitung verfolgt werden.

Antennenverwaltung

Die verwalteten Antennen werden in einer relationalen Antennendatenbank abgelegt. Neben den für RA_3DIO relevanten Antennenparametern können auch ohne grossen Aufwand zusätzliche Antennenattribute abgespeichert werden. Die Datenbank kann entweder zentral und von mehreren Benutzern gleichzeitig oder lokal verwendet werden. Durch die strikte Trennung zwischen Gelände- und Antennendaten ist einfaches Manipulieren der Antennendatenbank ohne RA_3DIO durchaus möglich. Dies gestattet, bestehende Antennendatenbestände einfach zu integrieren. So kann zum Beispiel eine Telekommunikationsfirma ihr aktuelles Antennennetz in RA_3DIO visualisieren und eventuell ergänzen.

Zusammenfassung und Ausblick

RA_3DIO kombiniert die Vorzüge eines sehr schnellen Terrain-Explorers mit einer Toolbox für die Antennenplatzierung und -verwaltung. Dadurch ist ein Werkzeug entstanden, dass sowohl für die Neukonzeption von Funknetzen als auch für die Verwaltung und Veränderung von bestehenden Netzen eingesetzt werden kann. Durch ihre einfache Handhabung und ihre geringen Hardware-Ansprüche (leistungsfähiger PC mit gutem Grafikadapter) ist RA_3DIO schnell und flexibel einsetzbar. Dies ist ein nicht zu unterschätzender Vorteil, wenn es darum geht, die Software auf einem Laptop ins Feld mitnehmen zu können oder an einer Versammlung von Anwohnern die Situation und allfällige Szenarien darzulegen. Gerade im Zusammenhang mit den Anwohnern, welche über eine Beeinträchtigung der Lebensqualität durch Mobilfunkantennen aufmerksam machen, könnte unser neu entwickeltes Computerprogramm einen Beitrag zu einer fundierten Diskussion zwischen Anbietern und Anrainern von Mobilfunkantennen leisten.