

# Simulationen zur Verbesserung des FLARM-

CHRISTIAN D. BERWEGER, LUKAS SCHULER (XIRRUS GMBH, ZÜRICH)

xirus  
2007

1 2 3 4 5 6 7 8 18

Auch wenn sich FLARM in der Praxis seit vier Jahren bewährt hat, so müssen die technischen Leistungsgrenzen dennoch verstanden werden.

Simulationen des Funkprotokolls zwischen den Geräten haben einige dieser Aspekte beleuchtet. Dabei geht es letztlich um die Minimierung von Kollisionen von Funkmeldungen (nicht Flugzeuge). Dieser Text zeigt auf, welchen Fragenstellungen man wie nachgegangen ist, und dass man dazu nicht Flugzeuge zu fliegen braucht.

**H**errliches Frühsommerwetter, klare Luft, Schönwetterwolken – ideal für einen Segelflug. Hochbetrieb auf dem Segelfluggelände. Pausenlos katapultiert die Seilwinde Segelflugzeuge in den Himmel. Mehrere Flugzeuge kreisen unter einer Wolke. Zusätzliche Flugzeuge stoßen hinzu, FLARM piepst. Kann FLARM von den Flugzeugen in der näheren Umgebung überhaupt in ausreichender Weise deren Funkmeldungen entgegennehmen?

Es kann, wie eine Simulationsstudie der zugrunde liegenden Funkkommunikation ergab. xirus GmbH – ein Spezialist in computergestützten Simulationsverfahren – hat diese Studie im Auftrag von FLARM Technology GmbH durchgeführt, namentlich hinsichtlich der Verbesserungen am Funkprotokoll, die seit April 2008 in der Software-Version 4 Anwendung finden. Dabei ging es um die Verifizierung von Durchsatzraten, das Bestimmen von Leistungsbeschränkungen sowie das Optimieren von Protokollparametern anhand realitätsnaher Szenarien.

## Spitzenreichweite über 10 km

Eine Kernfunktion von FLARM und den dazu kompatiblen Geräten beruht darin, dass jedes Gerät periodisch – meist sekundlich, in bestimmten Situationen auch häufiger – den prognostizierten eigenen Flugweg, eine Identifikation sowie weitere zweckdienliche Daten in einer kurzen digitalen Funkmeldung ausstrahlt. Geräte innerhalb der Reichweite empfangen diese Meldung und berechnen aus dem Vergleich der eigenen Flugwegprognose und der vielen empfangenen Flugwegprognosen mögliche Gefahren. Aus diesen Informationen werden die Warnungen und die Anzeige des umliegenden Verkehrs erstellt.

Verschiedene Faktoren bestimmen dabei, ob die Funkmeldung tatsächlich empfangen und verarbeitet werden kann. Nicht Gegenstand dieser Abklärung sind die Leistungsgrenzen bei der rechnerischen Bearbeitung korrekt empfangener Daten. Die Simulation liefert hier allerdings Hinweise darauf, welche Rechenlast potenziell bewältigt werden muss und welche Filter folglich anzubringen sind.

# Funkprotokolls

km 10 11 12 13 14 15 16 17

Beispielsweise entscheidet der Einbau der Antenne im Flugzeug wesentlich über Ausstrahlung und Empfang, denn durch abschirmende Teile des Flugzeugs werden die Signale gedämpft. FLARM bietet dazu ein web-basiertes Werkzeug an, welches aus einer IGC-Datei diese Informationen extrahiert und intuitiv darstellt ([www.flarm.com/support/analyze/](http://www.flarm.com/support/analyze/)) – nutzen Sie diesen kostenlosen Dienst zur Optimierung Ihres Einbaus! Analysen zeigen bei gutem Einbau in Segelflugzeugen typische Reichweiten zwischen 3 und 6 km, mit Spitzenleistungen deutlich über 10 km.

Bei gegebener Sendeleistung hängt die erzielbare Reichweite auch davon ab, wie die Antennen der beiden Flugzeuge relativ zueinander stehen. Im Falle der parallel zur Flugzeughochachse zu positionierenden Antennen von FLARM ist beispielsweise die Reichweite dann am besten, wenn zwei Antennen parallel nebeneinander stehen. Dies ist gut so.

## Mögliche Probleme beim Empfang

Wenn nun zwei Flugzeuge so positioniert

sind, dass sie gegenseitig innerhalb der Funkreichweite sind, dann ist noch nicht garantiert, dass eine Funkmeldung empfangen werden kann. Ein Gerät kann beispielsweise nicht gleichzeitig senden und empfangen, wodurch gegenwärtig gut eine von 200 Meldungen verloren geht. Mehrere Geräte senden unter Umständen überlappend, sodass die empfangenen Meldungen derart verwechselt werden, dass sie als ungültig verworfen werden. Dies ist nur dann ein Problem, wenn verschiedene eintreffende Meldungen ähnliche Sendepiegel haben, was eher selten der Fall ist. Entscheidend ist, dass der Empfänger jederzeit autonom entscheiden kann, ob eine Meldung gültig ist; dies ist in FLARM gewährleistet.

Idealerweise wird sichergestellt, dass gleichzeitiges Senden nie eintritt. Die praktische Umsetzung hiervon muss Abstriche machen. Ziel des Funkprotokolls ist es, bei gegebener Übertragungsrates und gegebenen technischen Komponenten aber hochgradig variablen Verkehrsdichten, eine maximale Bandbreitennutzung zu errei-

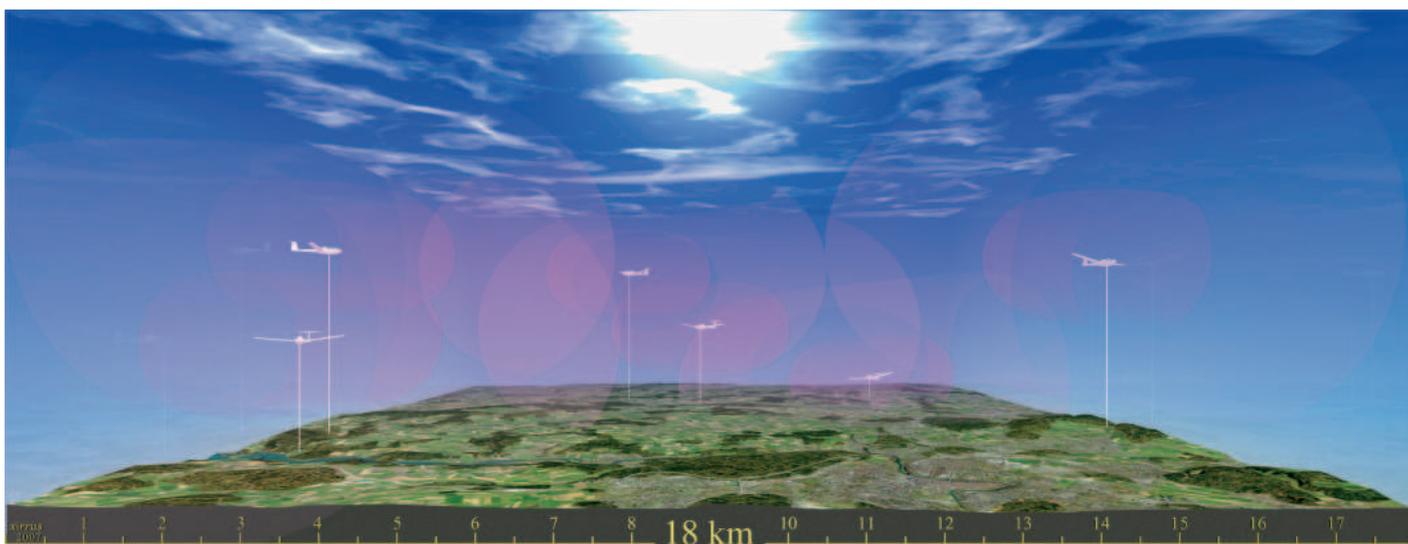
chen und dabei auch in Extremfällen für jeden einzelnen Teilnehmer gewisse Minimalanforderungen einzuhalten.

Eine Vielzahl technischer Kniffe wird hierzu verwendet. Dabei können etliche Parameter für realistische Szenarien optimiert werden, unter anderem synchronisierte Sendefenster, Listen-before-talk, Mehrfach- und Teilausstrahlungen oder Meldungslänge.

Einige dieser Parameter werden durch uns optimiert und dann als Konstanten im Funkprotokoll verwendet, andere werden situativ und dynamisch durch die Geräte angepasst.

## Vorteile des proprietären Funkprotokolls

Ein zentrales Element des proprietären Funkprotokolls ist, dass die Meldung nicht nur eine Position enthält, sondern bereits die dreidimensionale Flugwegvorhersage sowie eine fixe Identifikation. Dies führt zu entscheidenden Vorteilen, worauf nicht verzichtet werden sollte, wie Vergleichssimulationen zeigen: Erstens liegt die Flugwegprognose unmittelbar vor und muss nicht durch den Empfänger aufgrund



**Oben: Sechs Flugzeuge, je 50-fach vergrößert, mit zugehörigen Empfangsreichweiten. (Bild 1)**

**Rechts: Statische Empfangsstatistik bei verschiedener Verkehrsdichte. (Bild 2)**

früherer – evtl. ausgebliebener – Meldungen hergeleitet werden; dies würde zu ungenaueren, weniger verlässlichen und verzögerten Daten und als Folge davon zu einer größeren Zahl von unnötigen Warnungen führen. Zweitens kann einfach erkannt werden, wenn eine Aktualisierungsmeldung ausgeblieben ist. Drittens kann in diesem Fall aufgrund der unmittelbar zuvor empfangenen Flugwegvorhersage trotz einer ausgebliebenen Meldung dennoch die aktualisierte Position mit hoher Genauigkeit hergestellt werden. Im Weiteren ist so die benötigte Rechenleistung minimiert, indem jedes Gerät nur seine eigenen Daten genau berechnen und prognostizieren muss und diese dann nur mit den vollständigen von anderen Geräten empfangenen Daten zu vergleichen braucht.

Jedes Gerät legt für jede Sekunde neu einen zufälligen Sendezeitpunkt während eines zulässigen Sendefensters fest. Über das GPS ist es möglich, dass alle Geräte dahingehend synchronisiert sind, dass überall die Sekunde etwa gleichzeitig beginnt. Diese Synchronisation geht nicht derart weit wie etwa in Anwendungen der Verkehrsfliegerei (bspw. VHF Data Link 4), was die Kosten verringert, aber etwas Bandbreite kostet. Aufgrund unserer Simulation wurde die Festlegung des zulässigen Sendefensters optimiert. Unterhalb einer bestimmten Verkehrsdichte werden zudem (Teil-)Meldungen mehrfach gesendet. Dank der Simulation konnte diese Schwelle optimiert werden.

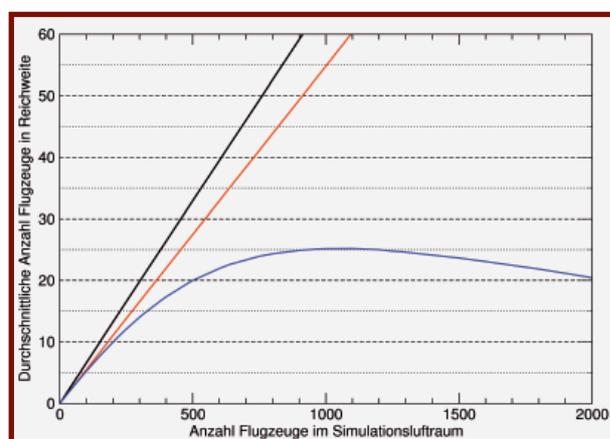
Unmittelbar bevor ein Gerät nun senden

will, überprüft es kurz, ob bereits eine andere Sendung empfangen wird.

Falls ja, wird die eigene Sendung verzögert. Wir haben für FLARM optimiert, wie diese Verzögerung terminiert werden muss.

Dabei muss beachtet werden, dass die Verzögerung nicht einfach zu einer Nicht-Sendung führen darf und ein Gerät nicht mehrfach nacheinander nachgibt. Zudem muss verhindert werden, dass bei einer großen (Funk-)Verkehrsdichte fast alle Geräte sich gleichzeitig zurückhalten, um kurz darauf alle miteinander zu senden. Die Situation hat eine gewisse Ähnlichkeit mit dem dynamischen Rauschpegel im Konzertsaal vor einem Konzert, wenn alle darauf warten, dass es beginnt.

Trotz der an sich einfachen Ausgangslage sind diese Fragestellungen hochkomplex und nur beschränkt intuitiv zugänglich. Ebenso können sie nicht durch Experimente mit echten Flugzeugen gemacht werden. Hingegen sind diese Fragestellungen geeignet für computergestützte sogenannte Monte-Carlo-Simulationen, da die zugrunde liegenden Mechanismen definiert sind. Der Computer erzeugt dazu eine große Zahl von Szenarien. In jedem Szenario wird der Luftraum zufällig mit einer Anzahl Flugzeugen bestückt, die aber realistischen Rahmenbedingungen folgen. Beispielsweise werden die Flugzeugdichten, die Höhenverteilungen, der Anteil der kreisenden Flugzeuge



sowie die Querneigung über Daten aus OLC kalibriert.

**Szenarien im virtuellen Luftraum**

**Bild 1** zeigt illustrativ, wie man sich ein einzelnes Szenario vorstellen kann. Ein virtueller und seitlich periodischer Luftraum von 18 x 18 km (also größer als die übliche maximale Reichweite) ist mit sechs Flugzeugen bestückt. Die schwach rosa eingezeichneten, schwimmringartigen Gebilde um jedes Flugzeug stellen die Funkreichweite dar. Befinden sich zwei Flugzeuge innerhalb ihrer jeweiligen Reichweiten – z.B. die beiden am linken Rand – können sie sich verständigen. Ein Flugzeug rechts oben ist alleine unterwegs, es kann keine Informationen austauschen, es besteht aber auch kein Anlass dazu.

In der Simulation wird die Kommunikationsleistung für jedes mögliche Sender-Empfänger-Paar – im vorliegenden Fall 15 Paare – einzeln abgearbeitet und statistisch ausgewertet. Die Zahl der Simulationen steuert die Streubreite der Resultate. Gewisse Simulationen sind statisch, andere decken eine Zeitsequenz ab, bspw. wenn es

darum geht, wie ausgebliebene Meldungen erkannt und wiederhergestellt werden.

Zur Ermittlung der Leistungsgrenze wurde der obige Luftraum mit bis zu Tausenden Flugzeugen bestückt. **Bild 2** zeigt die zugehörige Statistik, wobei je nach Flugzeugdichte bis zu 480.000 Szenarien ausgewertet wurden. Die vertikale Achse zeigt die durchschnittliche Zahl der Flugzeug-Nachbarn bei 6 km Radius (schwarze Linie), die Zahl der Flugzeuge in Reichweite der Funkmeldung unter Berücksichtigung der Antennencharakteristik (rote Linie), und die Zahl korrekt empfangener Funkmeldungen aufgrund der effektiven statischen Übertragungsleistung des Funkprotokolls (blaue Linie).

Bei wenig Flugbetrieb wird jedes Gerät korrekt empfangen. Steigt die Zahl der Flugzeuge, so gibt es allmählich eine Degradation durch gegenseitige Meldungskollisionen. Die statische Kommunikationsleistung erreicht ein Maximum bei 25 empfangenen Nachbarn. Die zugehörige Flugzeugdichte ist mit 1.000 Flugzeugen sehr groß, und wird in der Praxis kaum erreicht. **Bild 3** zeigt illustrativ diese Situation.

Obwohl wir in dieser Konstellation durchschnittlich 25 Nachbarn empfangen, sind mehr als 60 in der Nähe. Wir empfangen in dieser Extremsituation nur etwa durchschnittlich ein Drittel der Umgebung. In der Simulation können wir nun dieser Situation im Detail nachgehen, wir haben ja die Detailangaben für jedes Flugzeug in jedem Szenario zur Verfügung.

Hier ist nun entscheidend, dass nicht zwingend von jedem Flugzeug eine Meldung pro Sekunde empfangen werden muss, und dass das Sendeverhalten jedes Geräts sekundlich neu definiert wird. Damit sind die Karten, welche Gerätepaare in einer Sekunde nicht kommunizieren können, wieder neu gemischt.

Anzeige

## Ülis Segelflugbedarf

### Produkte für mehr Sicherheit im Cockpit

**flarm** Kollisionswarngerät\* für Segelflugzeuge

- unterstützt den Piloten bei der Luftraumbeobachtung
- warnt frühzeitig vor gefährlichen Annäherungen anderer Flugzeuge
- warnt vor Seilbahnen, Stromleitungen und festen Hindernissen
- 12V, Stromaufnahme < 60mA
- Schnittstelle zu PDA-Navigationsprogrammen
- Neu 2006: mit Rundanzeige und SD-Kartenleser
- Zusatzgeräte: externe Anzeige und Sprachausgabegerät
- Einführungspreis für FLARM-kompatibles Einbaugerät ECW 100 für Segelflugzeuge, Motorsegler und UL

*\* Verbessert die Flugsicherheit, ersetzt nicht die notwendige Luftraumbeobachtung, ist kein absoluter Schutz vor Kollisionen*

Ülis Segelflugbedarf • Untergasse 1 • 63688 Gernern  
Tel. 06045-950100 • Fax 06045-952339  
info@segelflugbedarf24.de • www.segelflugbedarf24.de

Oben haben wir gesehen, dass die Empfangswahrscheinlichkeit einer einzelnen Meldung im Extremfall bei etwa 35 % liegt. Die Wahrscheinlichkeit, dass dieser Fall mehrfach in Folge eintritt, nimmt rasch ab. Dies ist auch analytisch herzuleiten, beispielsweise werden nach 3 zusätzlichen Sekunden 98,5% der Meldungen übertragen. Mit der Simulation können wir nun aber zusätzlich der Frage nachgehen, inwieweit die sich dabei verändernde Lage und Distanz der Flugzeuge die Systemleistung beeinflusst. Die Simulation zeigt hier, dass die Übertragungsleistung zwischen zwei sich nähernden Flugzeugen mit der Zeit noch stärker anwächst, weil die empfangene Signalstärke mit kürzerer Distanz zunimmt, was die Meldung selbst bei vielen überlappenden aber schwächeren Drittmeldungen empfangbarer macht. FLARM warnt

typischerweise 18 Sekunden vor dem Zusammenstoß, und schaltet bei 8 Sekunden auf die höchste Alarmstufe. Es ist auch bei den simulierten großen Verkehrsdichten nahezu ausgeschlossen, dass derart lange keine Meldung empfangbar ist.

**Fazit:** Die modulare computergestützte Simulationsplattform, welche wir im Auftrag von FLARM Technology GmbH entwickelt haben, erlaubt es, nicht nur einem Ist-Zustand vertieft nachzugehen, sondern auch verschiedene Erweiterungen und Änderungen vorgängig zu testen sowie Optimierungen vorzunehmen. Ist es z.B. sinnvoll, zusätzliche Information zu übermitteln, um weiterführende Analysen auf Empfängerseite auszuführen? Oder werden die Vorteile der Mehrinformation durch häufigere Fehlübertragungen aufgrund der längeren Funk-

meldungen zunichte gemacht?

Dabei können die einzelnen Module mit echten Datengespeist werden, bspw. bezüglich Antennencharakteristik oder Flugzeugkonstellationen.

**Ein Extremfall:  
1.000 Flugzeuge,  
je 12-fach vergrößert.  
(Bild 3)**

