

MENGENAL TEKNOLOGI 5 G & PEMANFAATAN PERANGKAT LUNAK UNTUK PEMODELANNYA

Bersama Tri Budi Santoso
Laboratorium Multimedia Communication, Gedung
Pasca Sarjana, It. 10,
Politeknik Elektronika Negeri Surabaya

MENGENAL TEKNOLOGI 5G

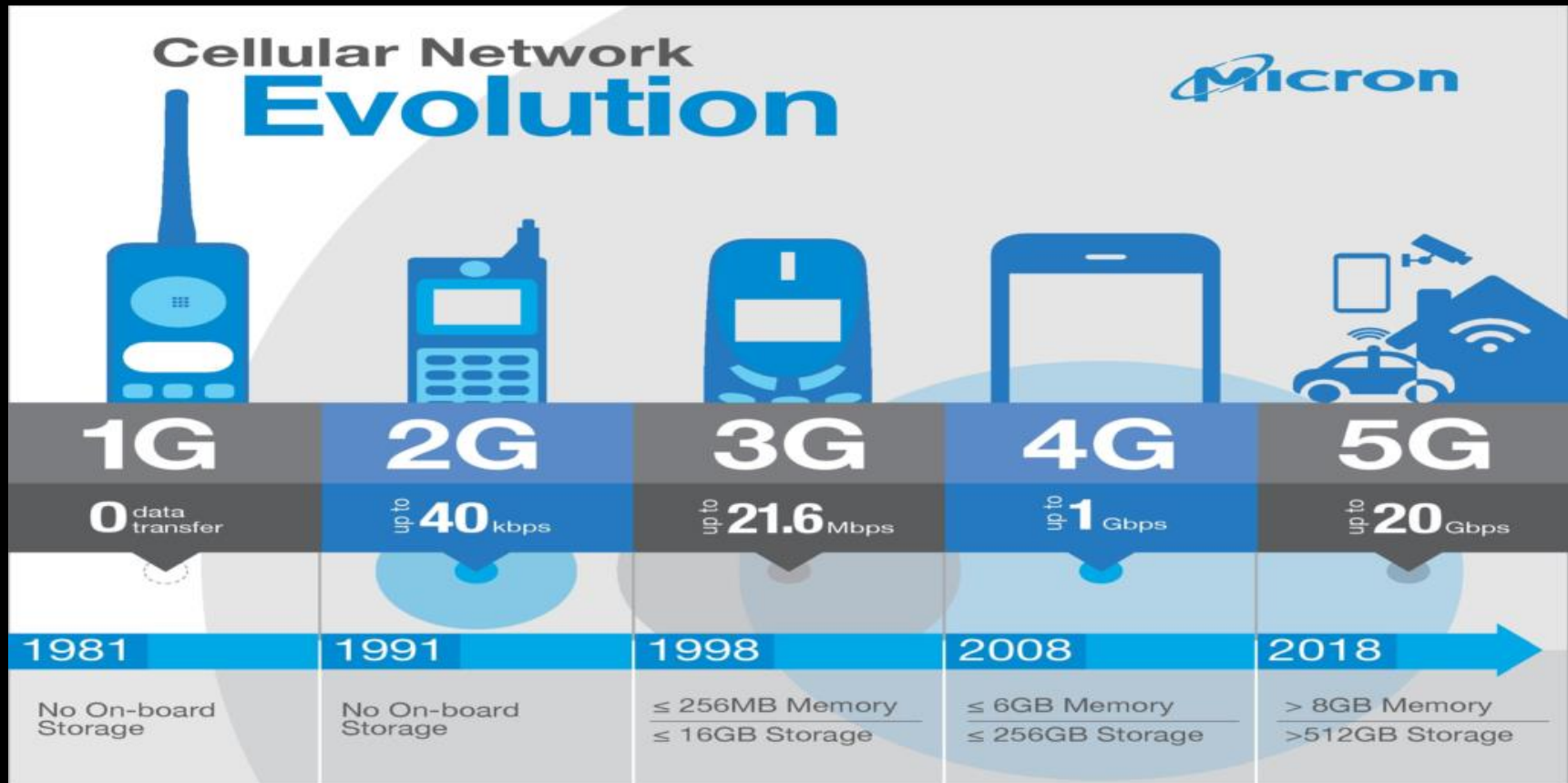
1. Teknologi dan Design
 2. Arsitektur dan Algorithm Baru
 3. Percepatan Proses Purwarupa dan Pengujian Lapangan
 4. Verifikasi Sistem dan Pengujian
-

BAG 1. TEKNOLOGI DAN DESIGN

- Apa yg dimaksud dengan 5G?
 - Apa saja yang men-drive 5G?
 - 5G Terminologi dan Aplikasi
 - Physical Layer Baru untuk 5G
 - Millimeter Wave Higher-Frequency
 - Massive MIMO: More Antennas
 - Prototyping untuk 5G Systems dengan Test beds
-

APA YANG DIMAKSUD DENGAN 5G

- 5G (5th generation wireless systems) adalah fase berikutnya pada standar mobile telecommunications.
- Scope pada 5G mengalami perubahan sangat besar dibanding generasi sebelumnya, dari layanan mobile broadband menuju ke *next-generation automobiles and connected devices*.



Apa yg dimaksud dengan 5G?



GAMBARAN DARI SISI PERANGKAT KOMUNIKASI (HANDPHONE)



1980s



1990s



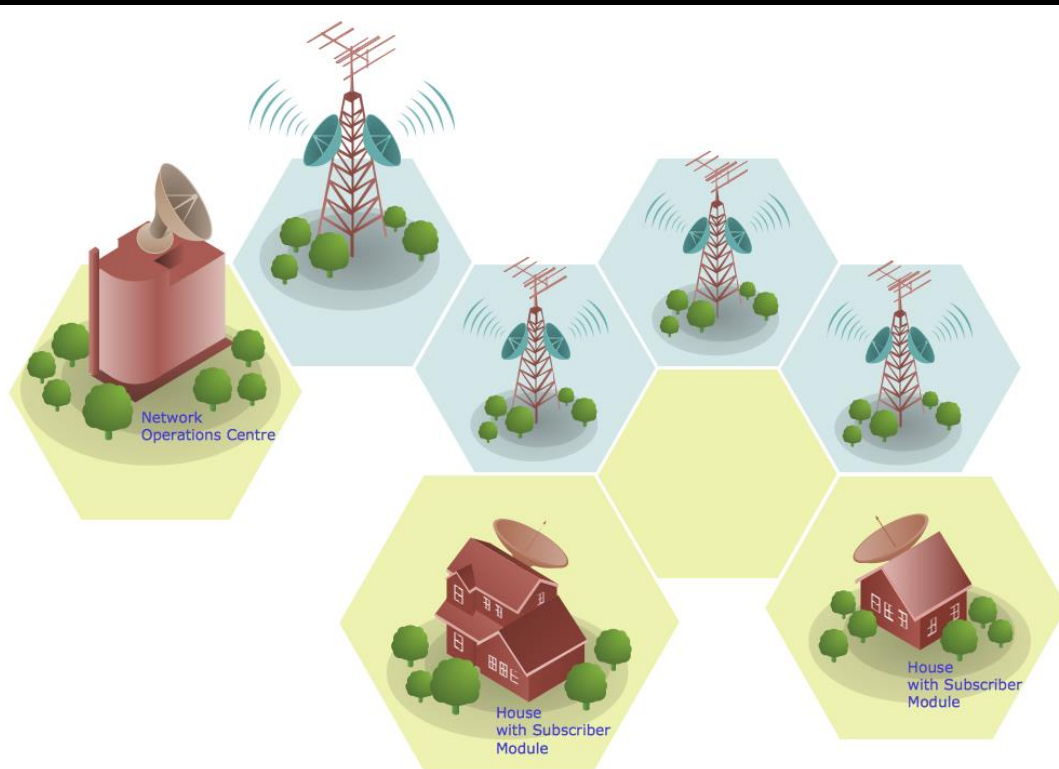
1998



2008

APA SAJA YANG MEN-DRIVE 5G?

- Dua hal utama dibalik percepatan munculnya 5G:
 - Kebutuhan yang melonjak pada wireless broadband yang mampu mengirimkan video dan beragam layanan beragam lainnya (*content-rich services*),
 - Internet of Things (IoT), yang memungkinkan beragam *smart devices* berkomunikasi melalui Internet.

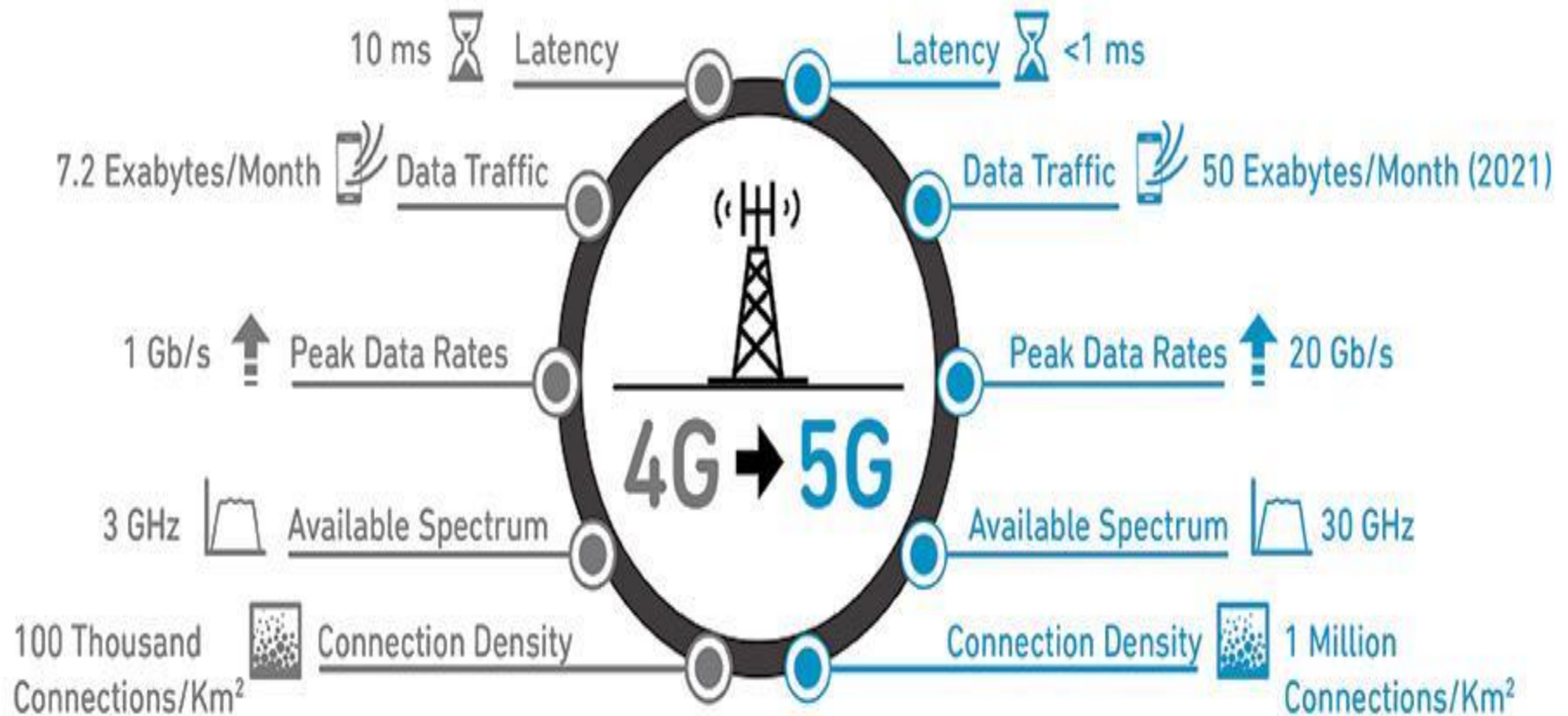


Untuk memenuhi hal ini:

- Penyelenggaraan broadband speed, ultralow latency, dan ultra reliable web connectivity
- Secara substansial memerlukan arsitektur, *radio access technology*, dan *physical layer algorithms* yang berbeda dengan sebelumnya.
- Dense networks pada *small cells* akan dilengkapi dengan *micro base stations*, beroperasi pada teknologi *millimeter wave* dan memanfaatkan *massive MIMO antenna arrays*.
- Processing components di dalam jaringan dan user devices akan lebih terintegrasi dan adaptif.

PERBANDINGAN 4G VS 5G

Comparing 4G and 5G



5G TERMINOLOGI DAN APLIKASI

Terminologi:

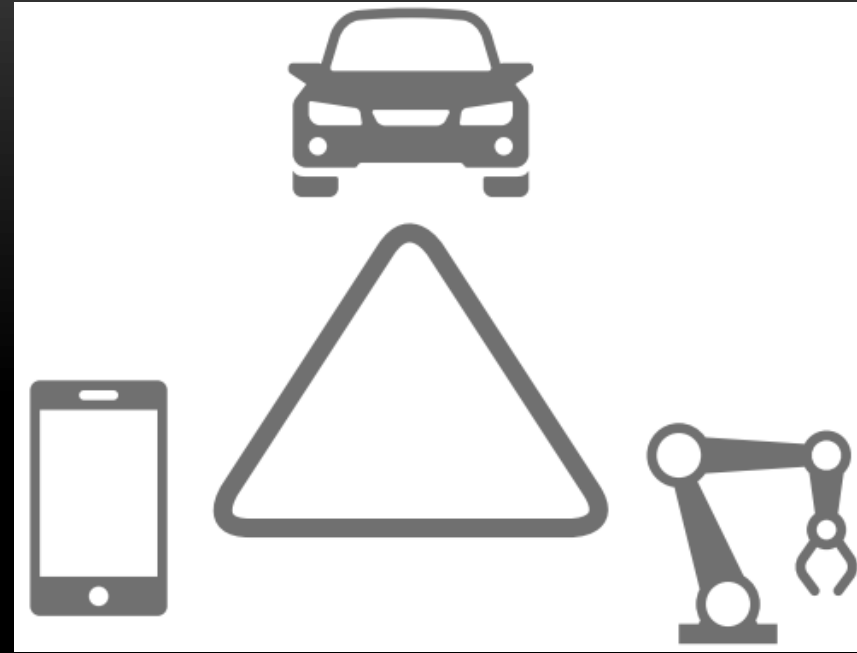
Dalam 5 parameter berikut. Pada beberapa literatur bisa disebutkan dengan istilah yang berbeda

Key 5G Parameters	
Latency in the air link	<1 ms
Latency end-to-end (device to core)	<10 ms
Connection density	100x vs. current 4G LTE
Area capacity density	1 (Tbit/s)/km ²
System spectral efficiency	10 (bit/s)/Hz/cell
Peak throughput (downlink) per connection	10 Gbit/s
Energy efficiency	>90% improvement over LTE

APLIKASI:

eMBB—Enhanced Mobile Broadband

- Untuk high-capacity and ultrafast mobile communications for phones and infrastructure,
- virtual and augmented reality,
- 3D and ultra-HDvideo,
- haptic feedback



URLLC—Ultrareliable and Low Latency

- vehicle-to-vehicle (V2V) dan vehicle-to-infrastructure (V2I) communications,
- autonomous driving

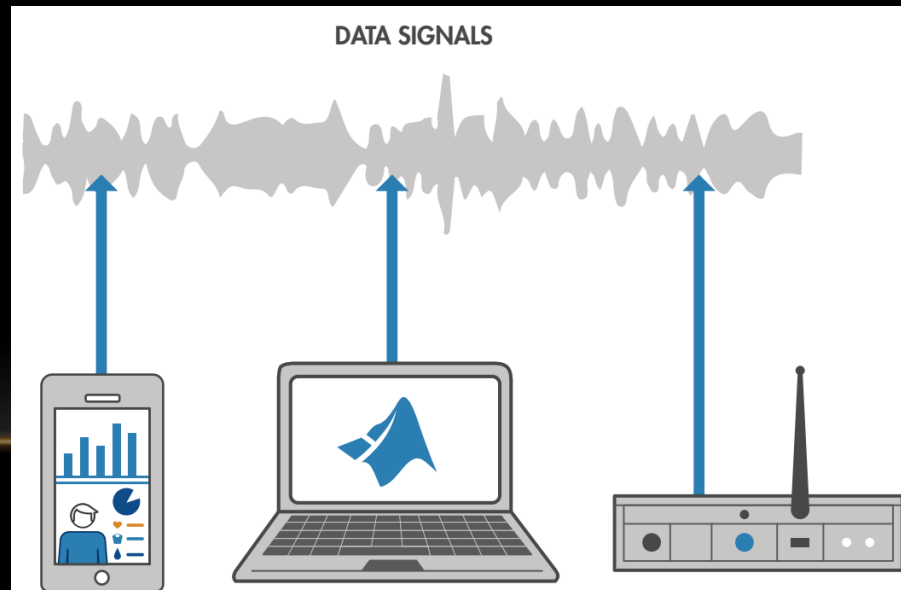
mMTC—Massive Machine-Type Communications

- consumer and industrial IoT,
- Industry 4.0 mission-critical machine-to-machine (MC-M2M)

PHYSICAL LAYER BARU UNTUK 5G

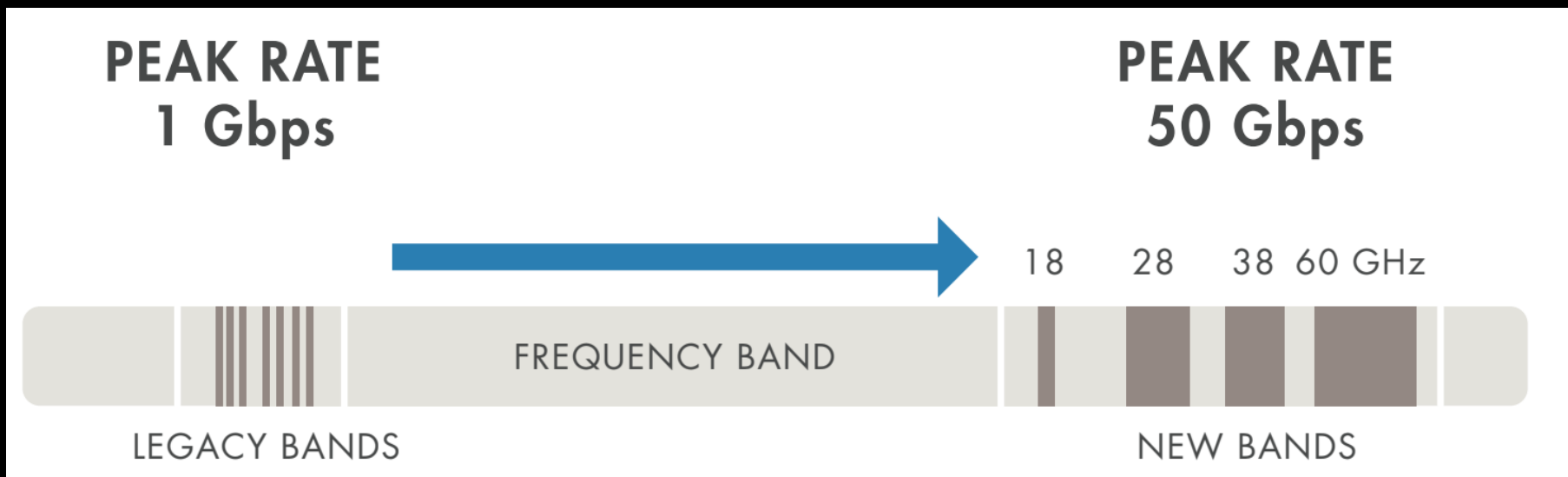
Hal ini ditujukan untuk meningkatkan spectral efficiency dan data rate:

- Satu perbedaan mencolok adalah pada peningkatan jumlah antenna aktif dan penggunaan antenna arrays, dan pengembangan pada aplikasi beam forming dan millimeter wave RF signal processing.
- Hal lain adalah teknik modulasi dan coding baru, power dan low-noise amplifier designs, model channel.



MILLIMETER WAVE HIGHER-FREQUENCY

- 5G equipment telah diuji coba dengan mobile network operators untuk menunjukkan kelayakannya pada higher frequency transmissions.
- Trial ini dilakukan pada midband spectrum dari 3.3 GHz to 5.0 GHz. Diharapkan ini mampu merepresentasikan kinerjanya pada mmWave spectrum (28 GHz ~ 39 GHz)

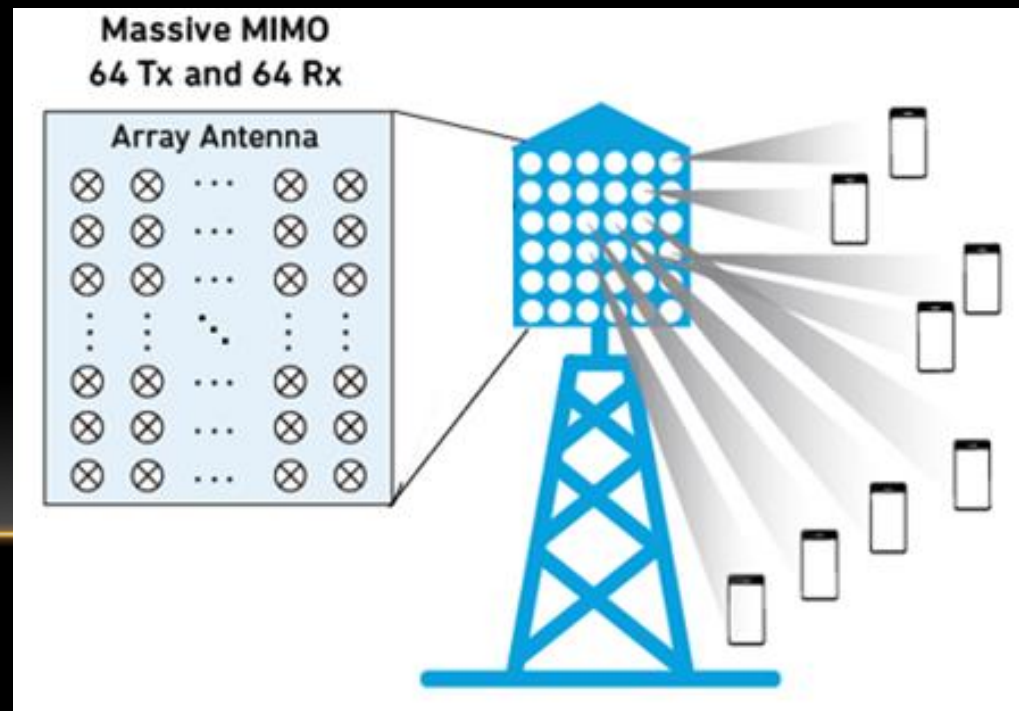


MASSIVE MIMO: MORE ANTENNAS

Massive MIMO, juga dikenal sebagai large-scale MIMO, adalah suatu bentuk multiuser MIMO yang memiliki jumlah antenna banyak pada base station yang mana lebih banyak dibanding jumlah device per signaling resource.

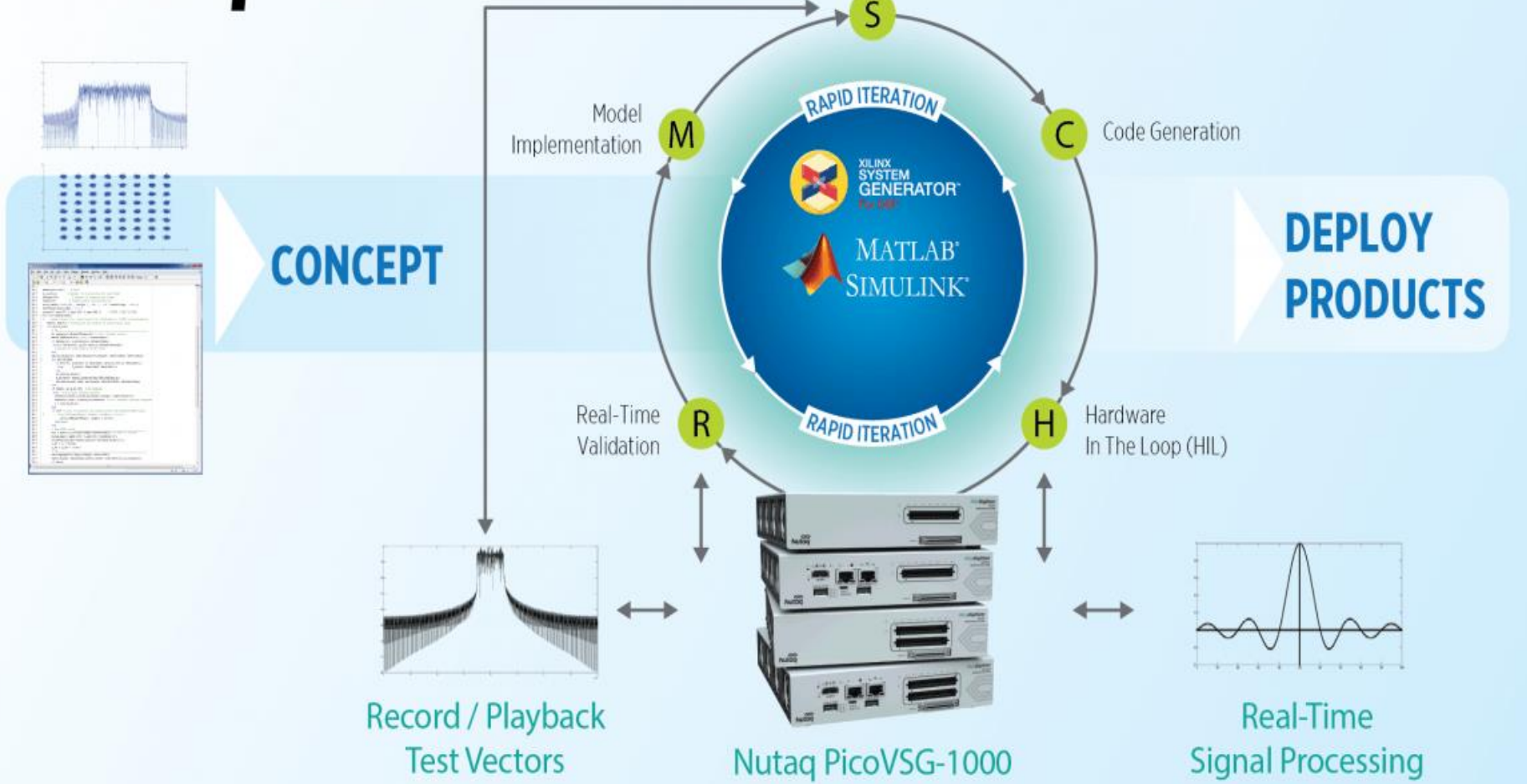
Tantangan bagi designer antenna:

- Mensimulasikan speed traditional antenna design tools terlalu lambat bagi large antenna arrays.
- Sulitnya mensimulasikan antenna coupling.
- Hybrid beam forming diperlukan untuk optimasi jumlah pada RF chains.



PROTOTYPING UNTUK 5G SYSTEMS DENGAN TEST BEDS

- Hardware testbeds harus mampu diberi perlakuan secara flexible dan didasarkan pada reconfigurable design platforms. Hal ini agar dapat disesuaikan dan memenuhi design secara cepat, menyesuaikan dengan peruntukan di dalam precommercial field trials.
- The tools dan workflows yang bekerja sebagai interface pada testbeds harus mendukung iterasi design secara cepat dan pemanfaatan design pada algorithm yang berubah-ubah



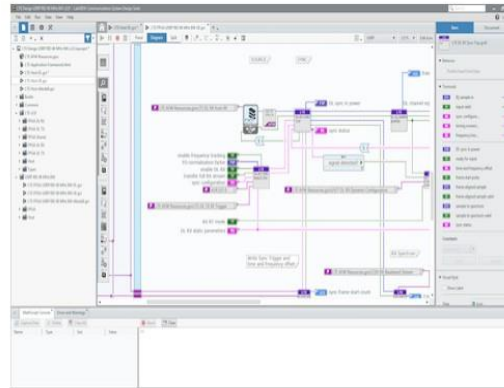
Hardware



MIMO Prototyping Hardware

- Modular RF SDR architecture based on USRP RIO
- Scalable multi-FPGA architecture
- Embedded μ processor
- Phase coherent RF channels
- Scalable number of BS antennas up to 128
- Scalable number of mobile station antennas up to 12

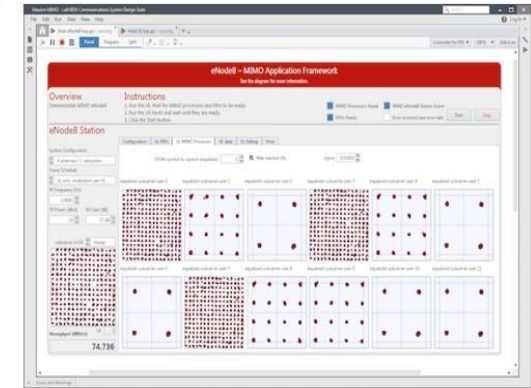
Software Design Environment



LabVIEW Communications

- Code development for μ processors and FPGAs
- Seamless integration with SDR hardware
- Supports graphical programming, C/C++, MathScript, VHDL, Verilog
- Support for real-time Linux based operating system

Modular Real-Time FPGA IP



MIMO Application Framework

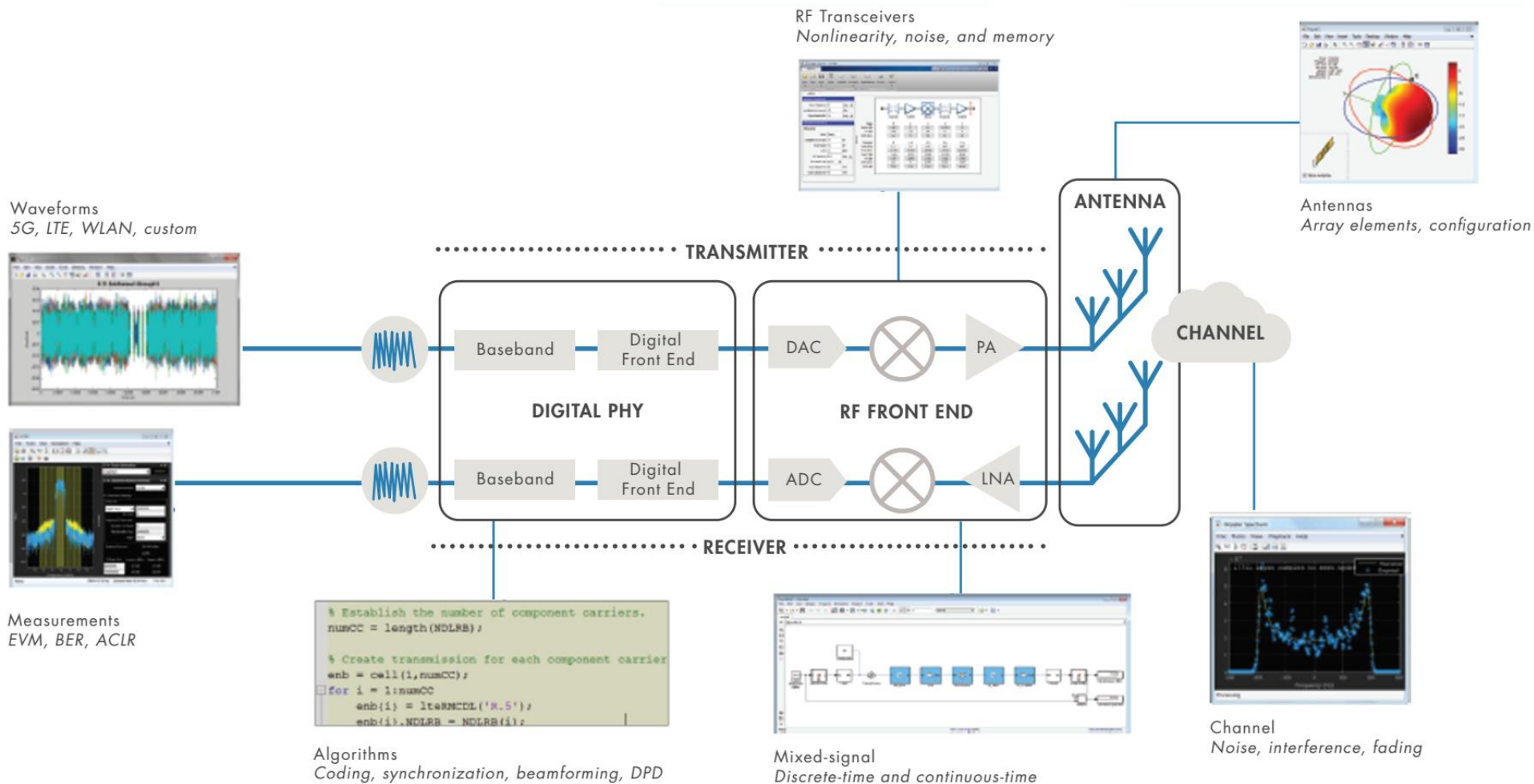
- Real-time FPGA IP for over-the-air, MIMO prototyping
- Supports single user MIMO, multi-user MIMO, and Massive MIMO
- Fully modifiable FPGA & Host source code
- Built-in channel reciprocity calibration, channel estimation, linear precoding, MIMO decoding

BAG 2. ARSITEKTUR DAN ALGORITHM BARU

- Arsitektur dan Algorithma untuk 5G
- Algorithm 5G Physical Layer untuk Fleksibilitas dan Spectral Efficiency
- Massive MIMO Arrays untuk High-Gain Beamforming
- Behavioral Simulation untuk Massive MIMO
- Optimizing Tradeoffs antara Antenna Gain dan Channel Capacity
- DII.

ARSITEKTUR DAN ALGORITMA UNTUK 5G

- Design arsitektur dan algoritma baru akan muncul, mulai dari antenna ke RF electronics, sampai dengan baseband.
- Kinerja pada subsystem-subsystem dilakukan secara ketat dan harus dievaluasi secara bersamaan.



ALGORITHM 5G PHYSICAL LAYER UNTUK FLEKSIBILITAS DAN SPECTRAL EFFICIENCY

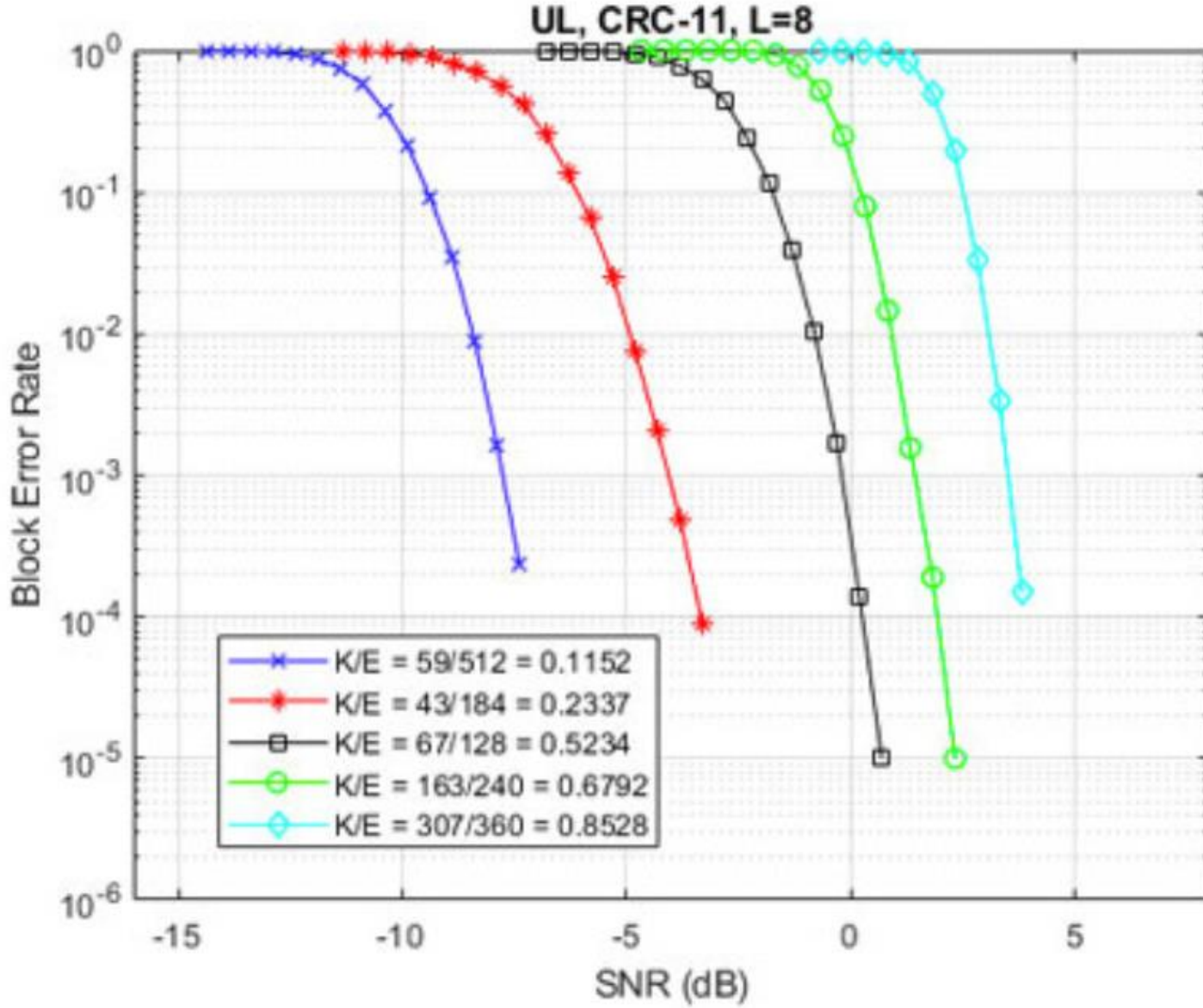
Beberapa hal berikut harus dipenuhi pada 5G:

- **Shorter slot durations**, terkait dengan peningkatan subcarrier spacing, untuk peningkatan signal bandwidth dan shorter latency
- **New channel coding methods** seperti LDPC for data dan polar codes untuk control information, dengan tujuan untuk meningkatkan efficient error correction dan peningkatan data rates
- **Spatial channel models** untuk operasi pada frekuensi (<6 GHz) yang digunakan sekarang ini, dan mmWave (>28 GHz) teknologi ke depan

Mathworks telah merilis beberapa fungsi untuk membantu proses design pada model 5G, sbb:

- **3GPP 5G standard-compliant OFDM waveform generation** menggunakan variable NR subcarrier spacing dan frame numerologies
- **Downlink dan Uplink channel and signals**, di dalamnya terdapat transport channels, physical channels, dan control information
- **New coding schemes such as LDPC** untuk error correction, dan **polar codes** control information untuk peningkatan data rates
- **Propagation channel models**, didalamnya terdapat tapped delay line (TDL) dan clustered delay line (CDL) channel models sesuai spesifikasi di 3GPP TR 38.901
- **Customizable link-level reference designs**, memungkinkan anda untuk membangkitkan 5G signals, mensimulasikan end-to-end NR PDSCH link throughput, dan menampilkan synchronization procedures melibatkan MIB decoding di dalam context PBCH beam sweeping.

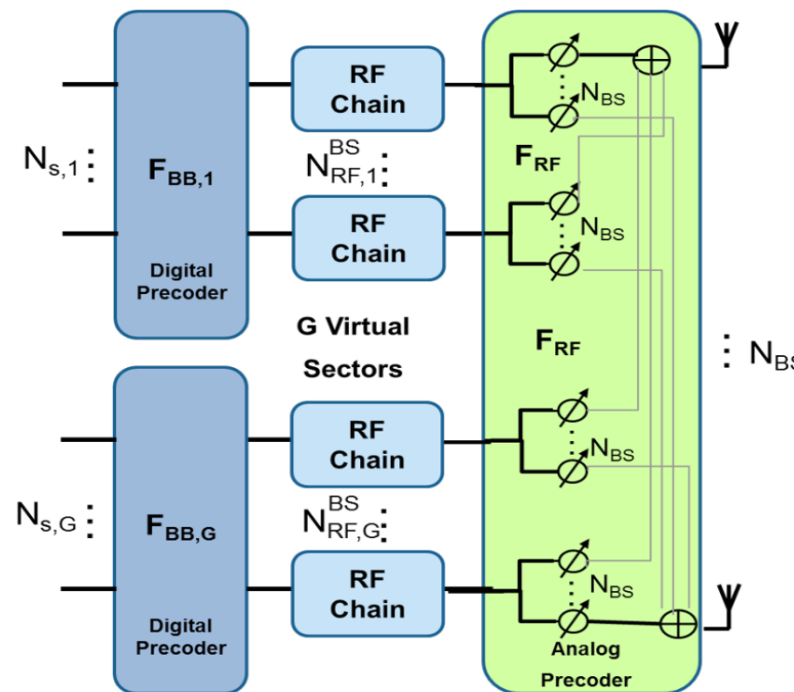
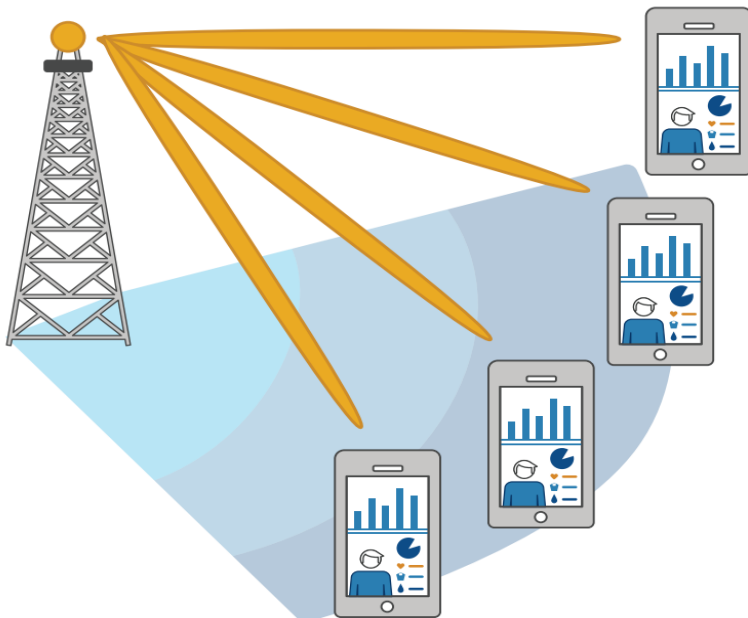
- *New coding schemes*



MASSIVE MIMO ARRAYS UNTUK HIGH-GAIN BEAMFORMING

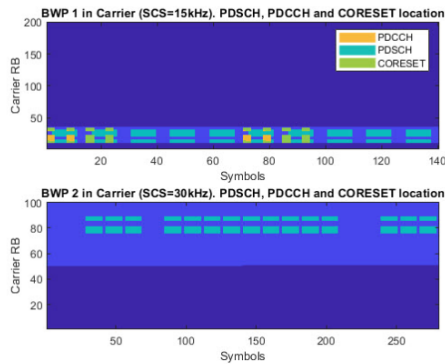
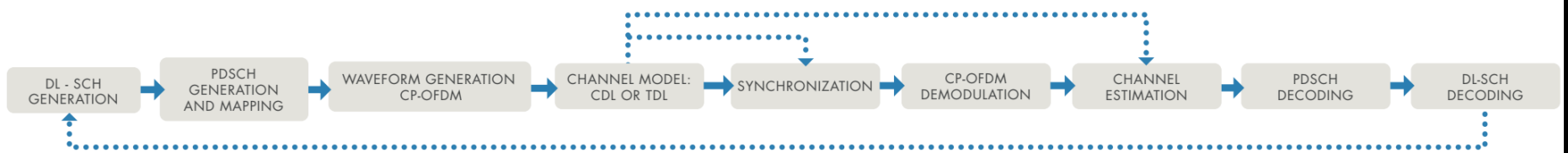
Design 5G mmWave memerlukan massive MIMO antenna arrays dengan ratusan elemen antenna pada antenna base stations (eNodeB)

- Banyaknya elemen antenna dalam suatu area kecil membikin praktis dalam penerimaan suatu *high beam forming gain*.
- Directional beams yang tinggi membantu offset peningkatan path loss pada operasi frekuensi lebih tinggi, beams mengarahkan power ke suatu specific direction.

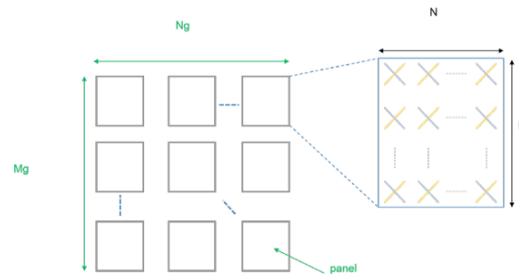


- **Customizable link-level reference designs**

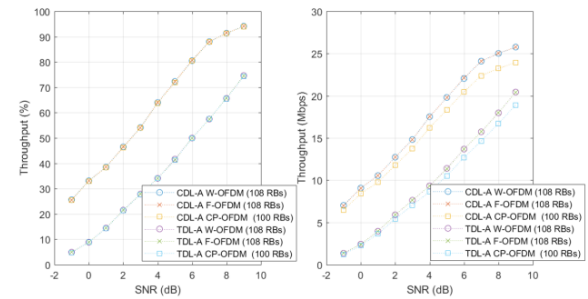
5G WAVEFORM



5G Resource Grid



3GPP 38.901 Channel Model



Throughput Measurement

Programmable in LabVIEW
Communications

Multi-Processor Subsystem

- Embedded μ processor
- FPGA

CPU
GPP

FPGA
DSP

Baseband
Converters

PLL

D/A

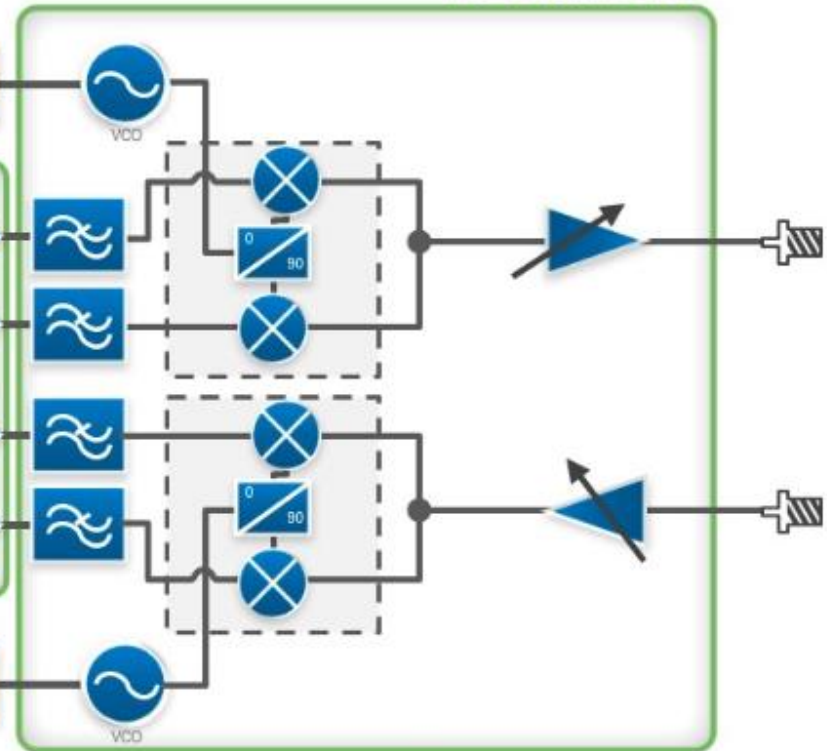
D/A

D/A

D/A

PLL

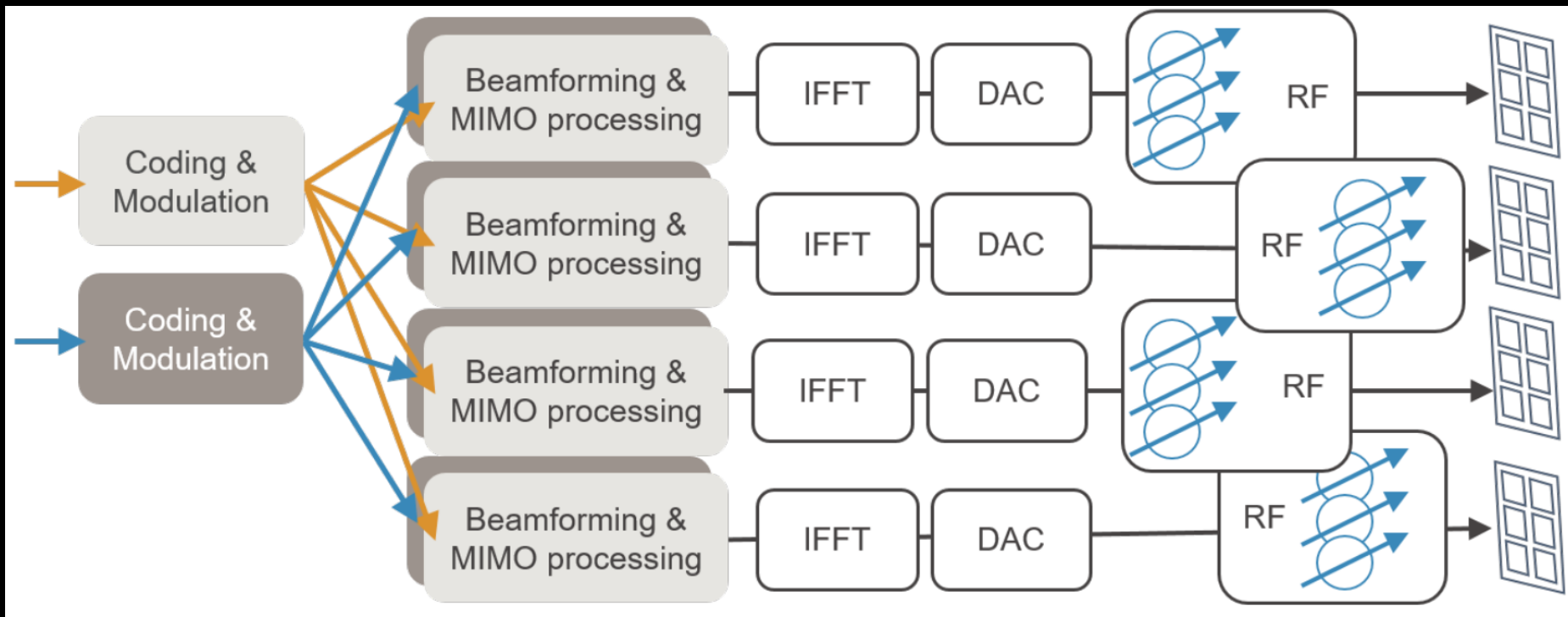
RF Front End



SDR hardware architecture consisting of CPU and FPGA processing dalam software LabVIEW Communications.

PERILAKU SIMULASI UNTUK MASSIVE MIMO

- Typical array designs melibatkan parameters seperti array geometry, element spacing, elemen lattice structure, element tapering, dan effects mutual coupling.
- Optimal design arus mampu mengkombinasikan model pada antenna array dan algoritma beamforming untuk mensimulasikan interaksi dan pengaruhnya pada kinerja sistem.



OPTIMISASI TRADEOFFS ANTARA ANTENNA GAIN DENGAN KAPASITAS CHANNEL

- Semakin besarnya gain pada antenna yang diperoleh dari narrower beams harus balanced dengan kenyataan bahwa sistem MIMO berada pada lingkungan dengan scattering yang tentu saja akan menimbulkan beam lebar untuk memaksimalkan kapasitas channel.
- Untuk pemahaman hal ini perlu dilakukan dengan memanfaatkan perangkat lunak, agar lebih mudah dan bisa memaksimalkan hasil design.
- Beberapa toolbox pada Matlab yang bisa digunakan:
 - Configure the Initial Array
 - Visualize the resulting geometry, 2D and 3D directivity, and the grating lobe diagrams.

- Configure the Initial Array

Antenna Designer - Antenna Properties

DESIGN

Frequency Range: New 2.100-24.2640 MHz

Impedance S Parameter: Frequency 2400 MHz

Current 3D Pattern AZ Pattern EL Pattern File Undo Export

SCALAR FREQUENCY ANALYSIS

show

APERTURE

- Waveguide
- Horn

DIPOLE FAMILY

- Dipole
- Folded
- Vee
- Mesner
- Horn
- Triangular
- Roundel
- Blade
- Cyloid

LOOP FAMILY

- Circular
- Rectangular

MONOPOLE FAMILY

- Monopole
- Tophat
- Inverted
- Inverted

OTHERS

- Horn
- YagiUda
- Sol
- Vivaldi
- Bladed

PATCH FAMILY

- Microstrip
- Pila
- Inverted Coplanar
- Inverted Loopplanar

SPIRAL FAMILY

- Archimedean
- Equilateral

Impedance

Impedance (ohms)

Frequency (GHz)

Resistance

Reactance

show

inverted coplanar antenna element

z (m)

x (m)

y (m)

metal

feed

dB

Magnitude (dB)

Frequency (Hz) $\times 10^9$

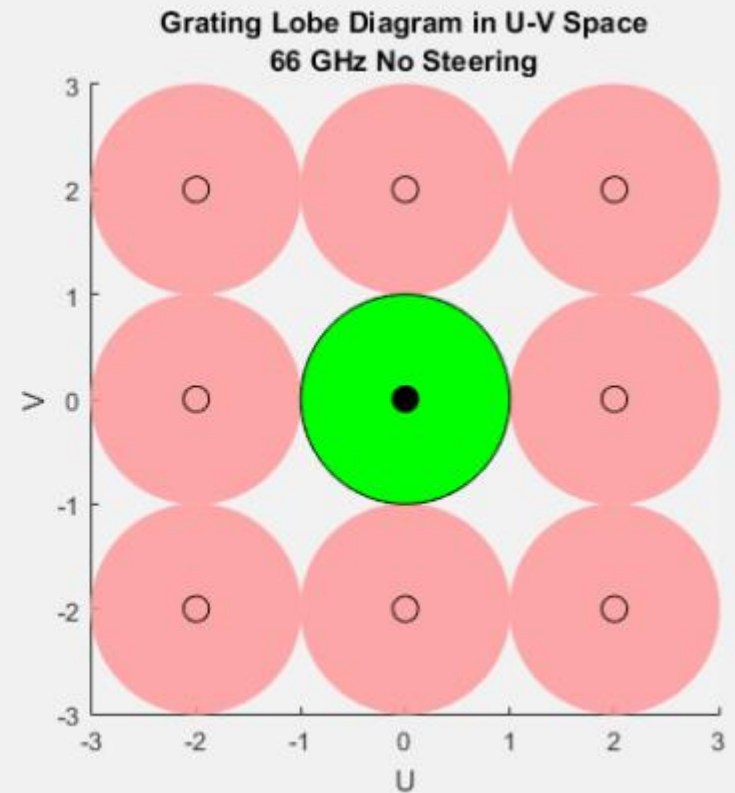
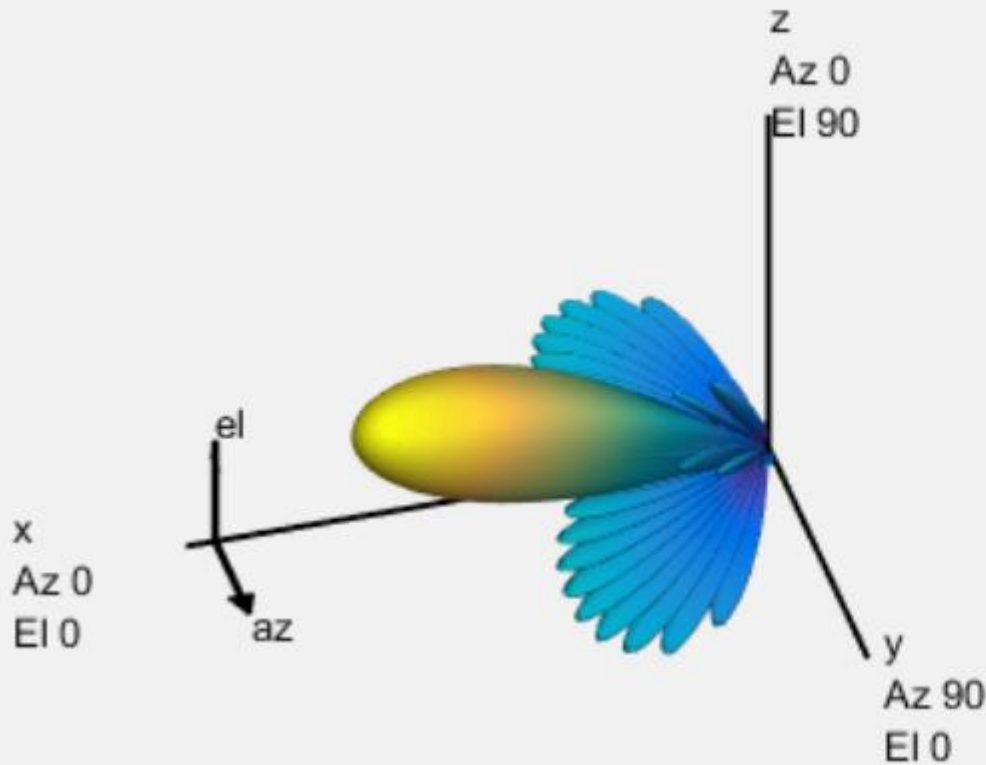
dB[S₁₁]

pattern

Show Antenna

The screenshot displays the Antenna Designer interface. On the left, a vertical toolbar lists various antenna families: APERTURE (Waveguide, Horn), DIPOLE FAMILY (Dipole, Folded, Vee, Mesner, Horn, Triangular, Roundel, Blade, Cyloid), LOOP FAMILY (Circular, Rectangular), MONOPOLE FAMILY (Monopole, Tophat, Inverted, Inverted), OTHERS (Horn, YagiUda, Sol, Vivaldi, Bladed), PATCH FAMILY (Microstrip, Pila, Inverted Coplanar, Inverted Loopplanar), and SPIRAL FAMILY (Archimedean, Equilateral). The main workspace is divided into four panels. The top-left panel shows a 3D model of an 'inverted coplanar antenna element' with a yellow metal patch on a substrate, with axes x, y, and z. The top-right panel is a line graph titled 'Impedance' showing Resistance (blue line) and Reactance (red line) in ohms versus Frequency in GHz. The bottom-left panel is a line graph titled 'dB' showing the magnitude of S₁₁ in dB versus Frequency in Hz (scaled by 10⁹). The bottom-right panel shows a radiation pattern visualization with a color scale from -12 dB to 2 dB, overlaid on a 3D coordinate system with x, y, and z axes. A 'Show Antenna' button is located at the bottom of this panel.

- Geometry, 2D and 3D directivity



BAG 3. PERCEPATAN PROSES PURWARUPA DAN PENGUJIAN LAPANGAN

- Percepatan Prototypes dan Pengujian Lapangan 5G
 - Studi Kasus: Membangun suatu Modulator dan Detector LTE OFDM
 - Siapa yang menggunakan workflow ini untuk 5G prototyping ?
-

PERCEPATAN PROTOTYPES DAN PENGUJIAN LAPANGAN

- Banyak prototype 5G yang telah dibangun dengan hardware FPGA dengan memanfaatkan embedded processors untuk beberapa bagian design. → ***dikenal sebagai testbed***
- Beberapa developer menggunakan software Matlab untuk memudahkan design dan pengujian. Dengan ***model-based design***, dapat dilakukan berbagai perancangan:
 - Explore algoritma dan membangun suatu standard-compliant reference dan test bench
 - Membangun suatu hardware-accurate model dalam Simulink menggunakan fixed-point algorithm blocks
 - Mempartisi model menjadi subsystems ditargetkan pada FPGA fabric dan processor untuk prototype
 - Secara otomatis membangkitkan target-independent atau target-optimized HDL dan C code
 - Automate prototyping pada SDRs dan FPGA atau SoC hardware
 - Integrasi dan menguji generated code ke suatu full radio platform design

STUDI KASUS: MEMBANGUN SUATU MODULATOR DAN DETECTOR LTE OFDM

- Berikut ini mengilustrasikan aplikasi pada Model-Based Design dalam context sebuah *LTE-compliant OFDM modulator and detector*
- Step-step transformasi suatu LTE cell search detection algorithm ke dalam HDL code untuk prototyping atau implementasi FPGA:
 - *Behavioral golden reference in MATLAB*
 - *Hardware-accurate model in Simulink*
 - *HDL code generated from the Simulink model*

ALGORITHM DESIGN (MATLAB)

Algorithm
Exploration

Golden
Reference

Test Bench

IMPLEMENTATION DESIGN (SIMULINK)

Architecture

Timing

Fixed-point

HARDWARE PROTOTYPE (HDL CODER™, EMBEDDED CODER®)

C Code

HDL

Processor

FPGA

SDR Platform

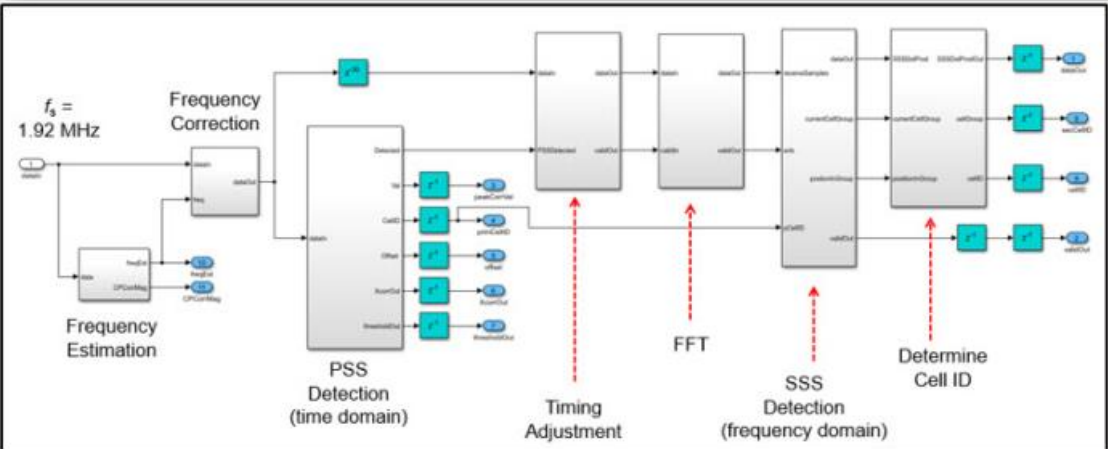
VERIFICATION

MATLAB
LTE golden reference

Simulink fixed-point
Bit-stream architecture

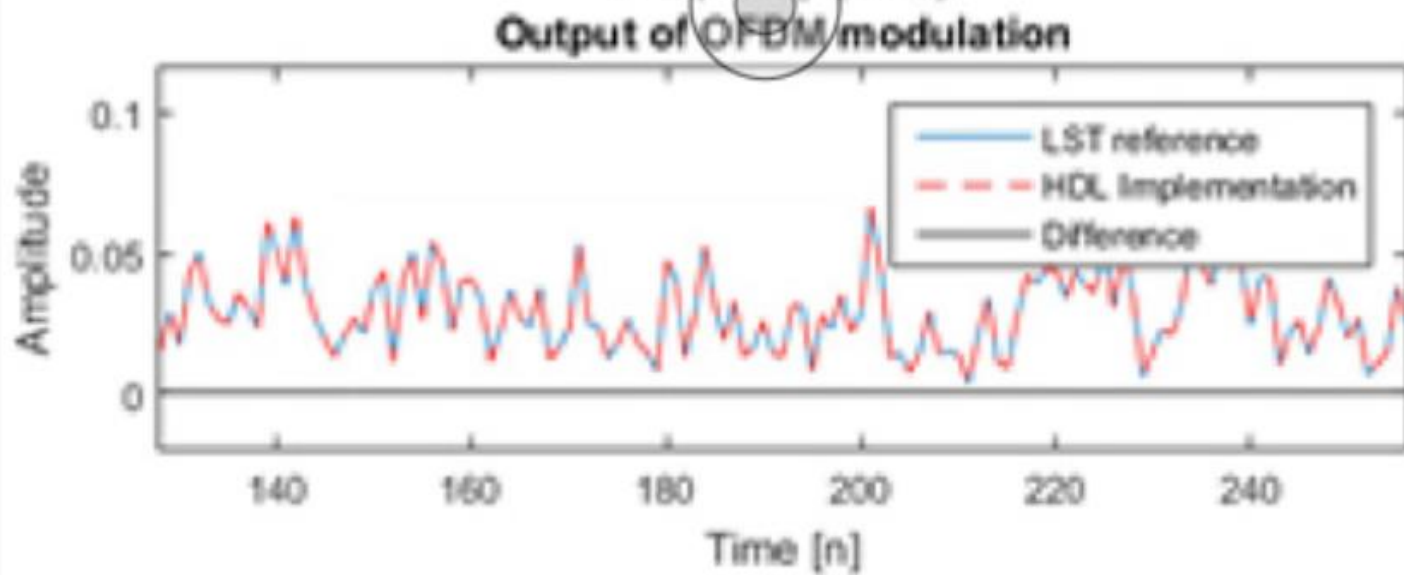
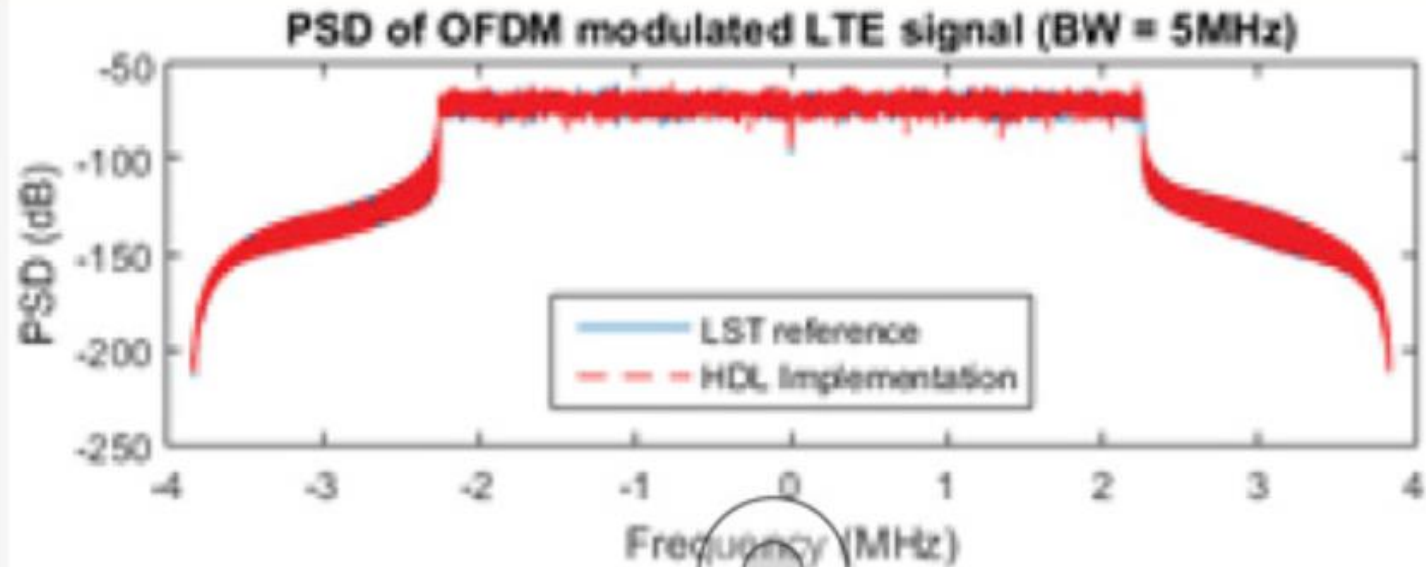
HDL code generation

```
[cellID,timingOffset] = lteCellSearch(enb,waveform);
```



```
ENTITY LTE_Detector_HDL IS
PORT (
  clk           : IN    std_logic;
  reset         : IN    std_logic;
  clk_enable    : IN    std_logic;
  dataIn_re     : IN    std_logic_vector(15 DOWNTO 0); -- sfix16_En14
  dataIn_im     : IN    std_logic_vector(15 DOWNTO 0); -- sfix16_En14
  ce_out        : OUT   std_logic;
  dataOut       : OUT   std_logic_vector(35 DOWNTO 0); -- sfix36_En8
  validOut      : OUT   std_logic;
  peakCorrVal   : OUT   std_logic_vector(31 DOWNTO 0); -- sfix32_En20
  primCellID    : OUT   std_logic_vector(15 DOWNTO 0); -- uint16
  offset        : OUT   std_logic_vector(14 DOWNTO 0); -- ufix15
  XcorrOut      : OUT   std_logic_vector(31 DOWNTO 0); -- sfix32_En20
  thresholdOut  : OUT   std_logic_vector(31 DOWNTO 0); -- sfix32_En20
  secCellID     : OUT   std_logic_vector(7 DOWNTO 0); -- uint8
  cellID        : OUT   std_logic_vector(8 DOWNTO 0); -- ufix9
  freqEst       : OUT   std_logic_vector(26 DOWNTO 0); -- sfix27_En27
  CPCorrMag     : OUT   std_logic_vector(24 DOWNTO 0); -- sfix25_En23
);
END LTE_Detector_HDL;
```

- *MATLAB reference code for LTE cell search,*
- *workflow for designing*
- *generating an HDL implementation of the algorithm.*



Verifikasi HDL implementation pada OFDM.

SIAPA YANG MENGGUNAKAN WORKFLOW INI UNTUK 5G PROTOTYPING ?

- Beberapa vendor 5G telah memanfaatkan model design spt ini, Hwawei, Ericson, dll

“When we do 5G prototyping design and development, we automatically generate HDL code from MATLAB for hardware verification. When we evaluate the algorithm in field testing, we can very effectively see the whole system’s performance and status, and identify any potential issues.”

— Kevin Law, Director of Algorithm Architecture and Design, Huawei

“When a new design is required because a new design idea emerges, using HDL Coder, we were able to demonstrate that the change was acceptable and have a working demonstration in less than one week.”

— Tomas Andersson, Ericsson

BAG 4. VERIFIKASI SISTEM DAN PENGUJIAN

- Verifikasi Sistem 5G dan Pengujiannya
 - 5G Live-Signal Generation and Reception
 - 5G Live Signals menggunakan Software-Defined Radio
 - Generation dan Capture suatu Live 5G Signals menggunakan RF Instruments
 - Analysis pada Massive Field Trial Data Sets
 - Test Data Capture dan Analysis
 - Data Processing dan Visualisasinya
 - Visualisasi pada 5G Field Test Results pada Peta
 - Analysis dan Results Sharing
-

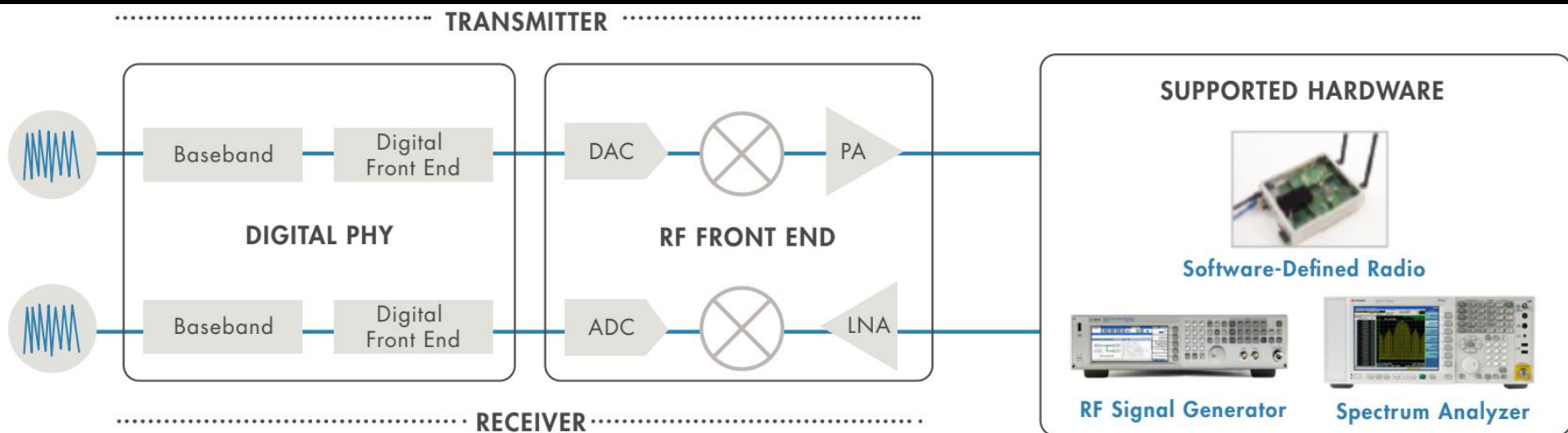
VERIFIKASI SISTEM 5G DAN PENGUJIANNYA

- Setelah melengkapi perancangan baseband, RF, dan antenna array, langkah selanjutnya adalah verifikasi apakah perancangan sistem telah memenuhi hasil di dalam skala lab dan skala lapangan (real-world conditions).
- Untuk melakukannya, engineers perlu melakukannya dengan *live 5G signals and waveforms* menggunakan interfaces untuk pengujiannya.



5G LIVE-SIGNAL GENERATION AND RECEPTION

- Melalui hubungan software-defined radio (SDR) dan RF instrument hardware, and adapat memanfaatkan *MATLAB®* and *Simulink®* untuk membentuk over the-air tests dalam memvalidasi design simulasi 5G, dalam skala lab, atau pengujian di real-world conditions.
- Test benches, signal generators, scopes, dan measurements digunakan pada simulation stage dapat digunakan ulang untuk hardware testing.



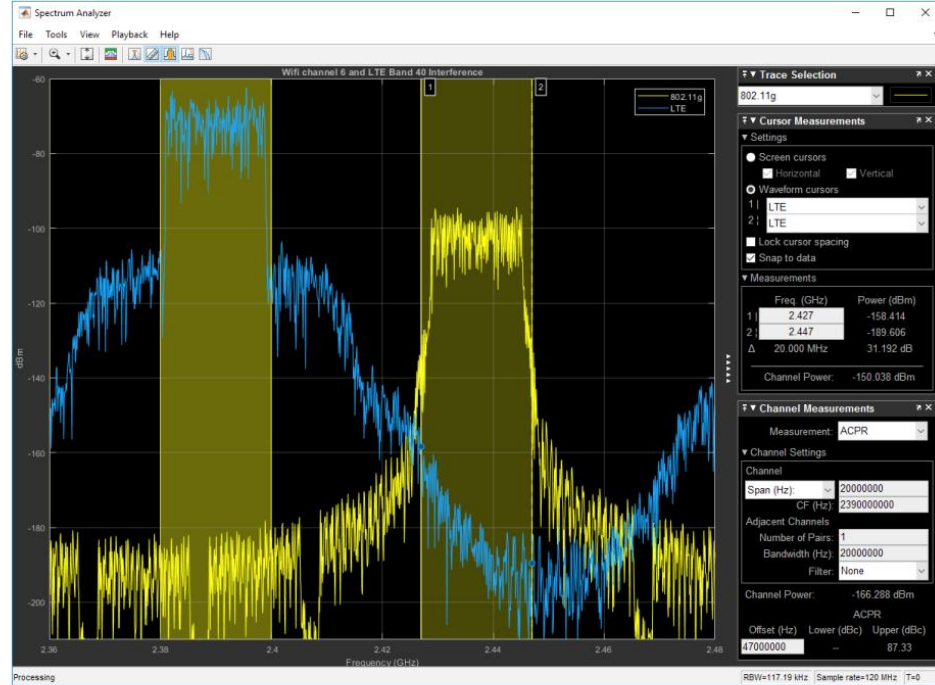
LTE Downlink E-TM Generator

Generate downlink test model (E-TM) waveforms. These are specified in TS36.141 (section 6) for testing the downlink transmitter characteristics.

Test model	1.1
Bandwidth	1.4MHz
Cell identity	1
Duplex mode	FDD
Number of subframes	10
Windowing (samples)	0
Waveform output variable	tmwaveform
Resource grid output variable	tmgrid
E-TM configuration output variable	tmconfig

Generate waveform

Help



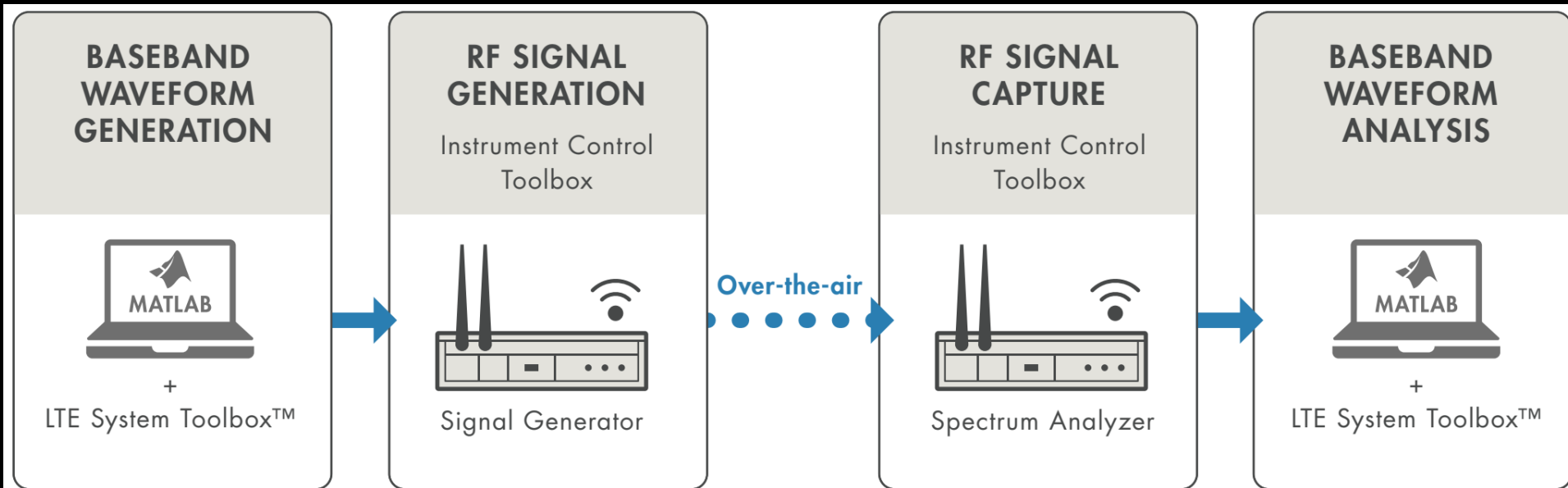
5G LIVE SIGNALS MENGGUNAKAN SOFTWARE-DEFINED RADIO

- Suatu software-defined radio (SDR) tersusun dari suatu configurable RF front end dengan suatu FPGA atau programmable SoC untuk membentuk fungsi-fungsi digital.
- MATLAB Simulink dengan SDR hardware sebagai suatu cost-effective, real-time platform untuk satu range pada wireless engineering tasks, melibatkan hal-ha berikut:
 - Over-the-air lab dan field testing menggunakan live RF signals
 - Signal capture untuk posttest analysis
 - Rapid verification dengan fungsi-fungsi customize radio



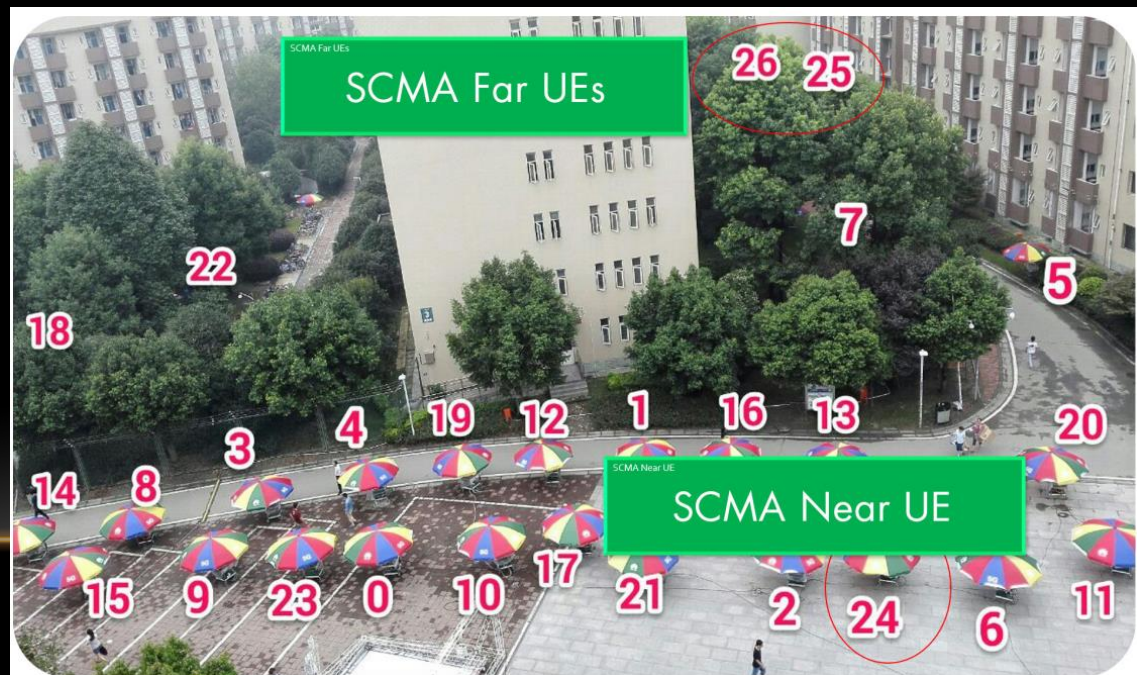
GENERATION DAN CAPTURE SUATU LIVE 5G SIGNALS MENGGUNAKAN RF INSTRUMENTS

- Untuk mentransmisi signal, anda dapat membangkitkan sinyal 5G baseband, ke suatu signal generator, configure dan mengontrol parameter-parameter baseband signal, dan melakukan up-convert IQ waveform ke RF dan mem-play back ke udara.
- Di sisi penerima, and adapat mengolah kembali IQ data ke suatu PC untuk analysis, perform visualization, melakukan penyusunan acquisition parameter secara programable, dan melakukan down-convert RF signal ke baseband di hardware



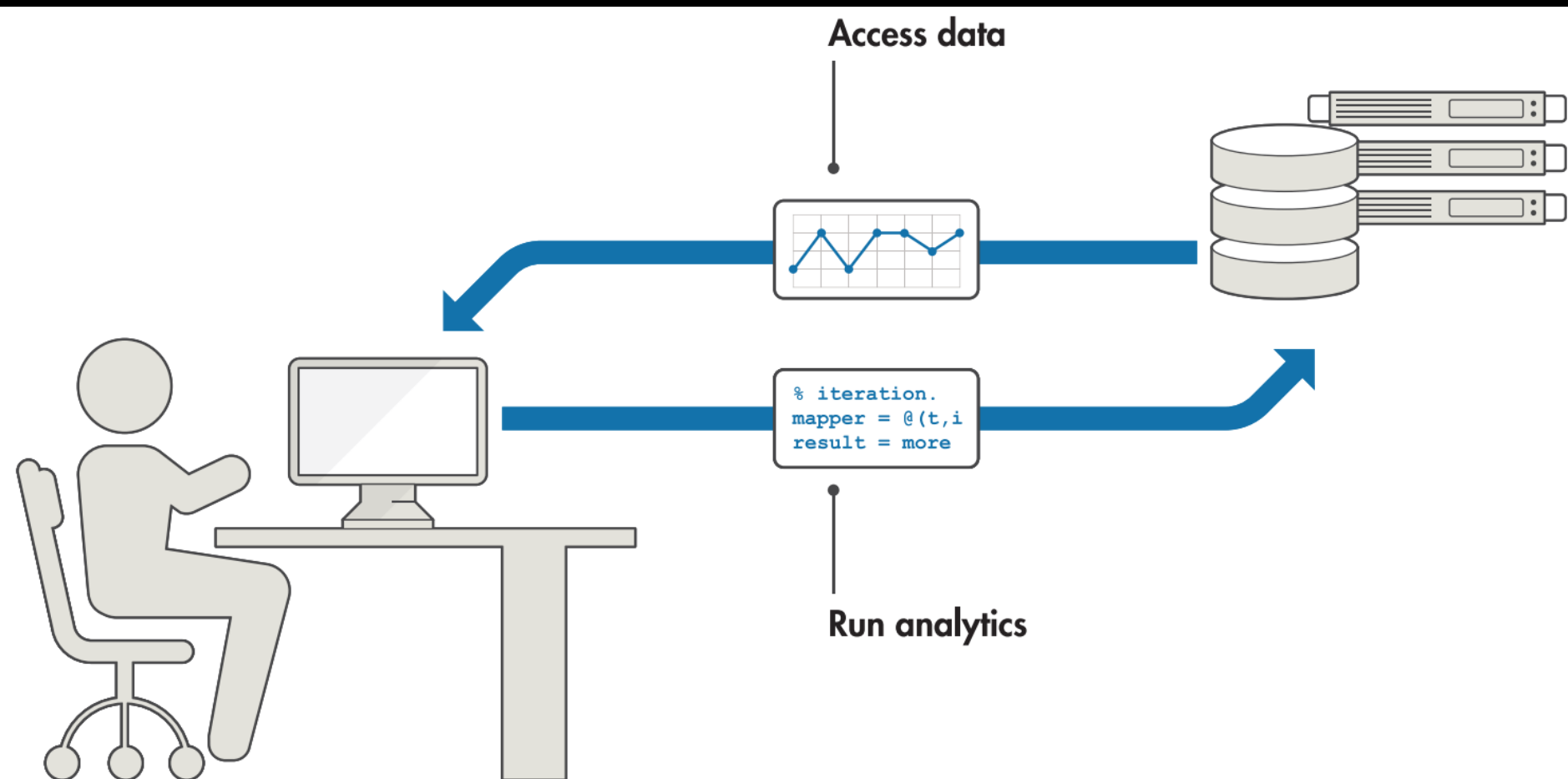
ANALYSIS PADA MASSIVE FIELD TRIAL DATA SETS

- Di dalam 5G field trial, beberapa parameters diukur dan dimonitor secara dinamis, misalnya reference signal received power (RSRP) dan reference signal received quality (RSRQ).
- Field trial system memerlukan suatu sistem test dan analysis yang mendukung scalable data capture, data processing, analysis, dan sharing hasilnya.



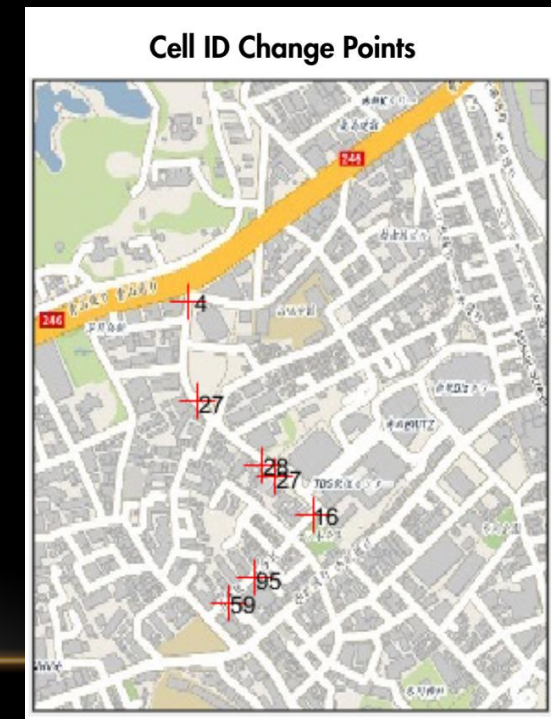
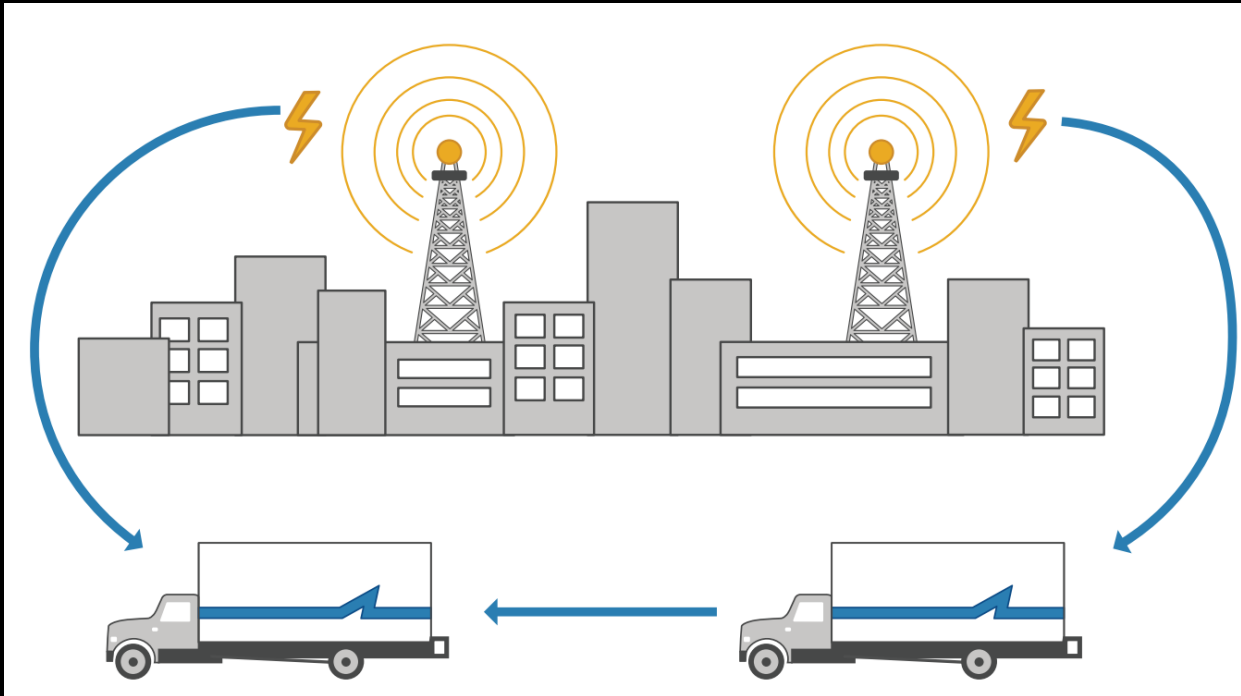
TEST DATA CAPTURE DAN ANALYSIS

- Field trial analysis software harus mampu untuk meng-import data secara langsung dari test instruments atau dari stored data dalam bentuk format bermacam-macam.



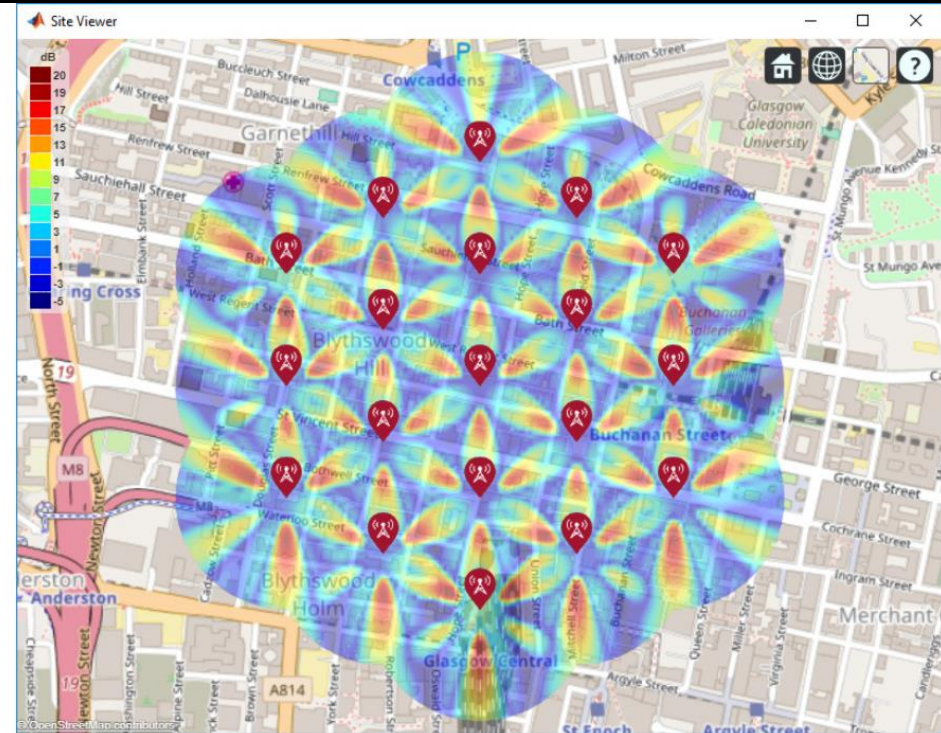
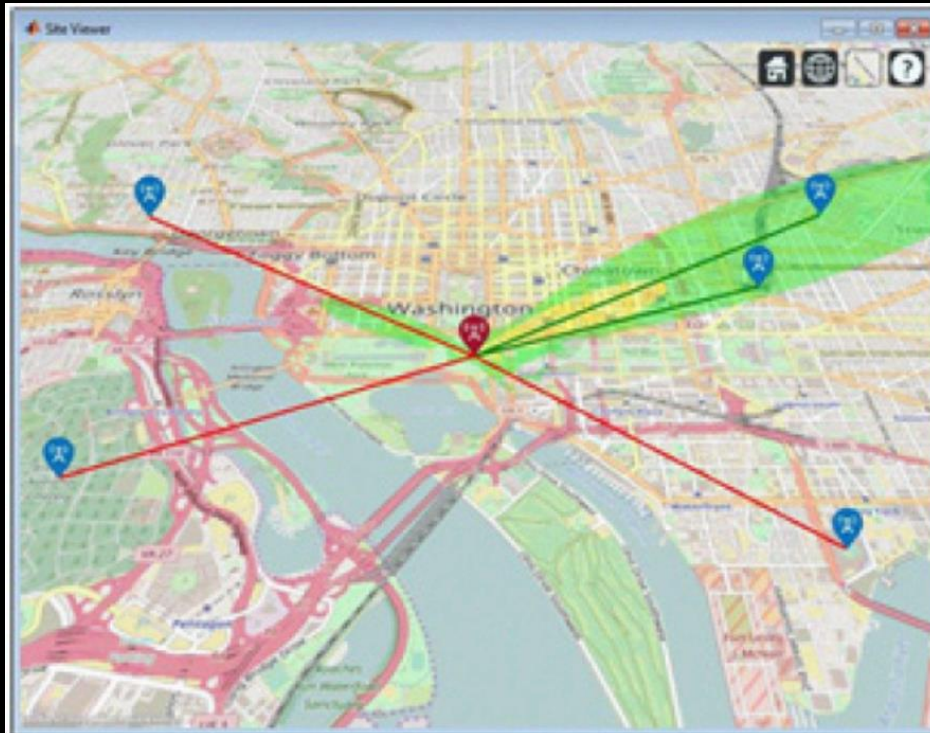
DATA PROCESSING DAN VISUALISASI

- Dapat untuk penggambaran cell handover points pada suatu peta, memutuskan jika signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) sudah cukup memenuhi, dan bagaimana kondisi variasi RSRP.



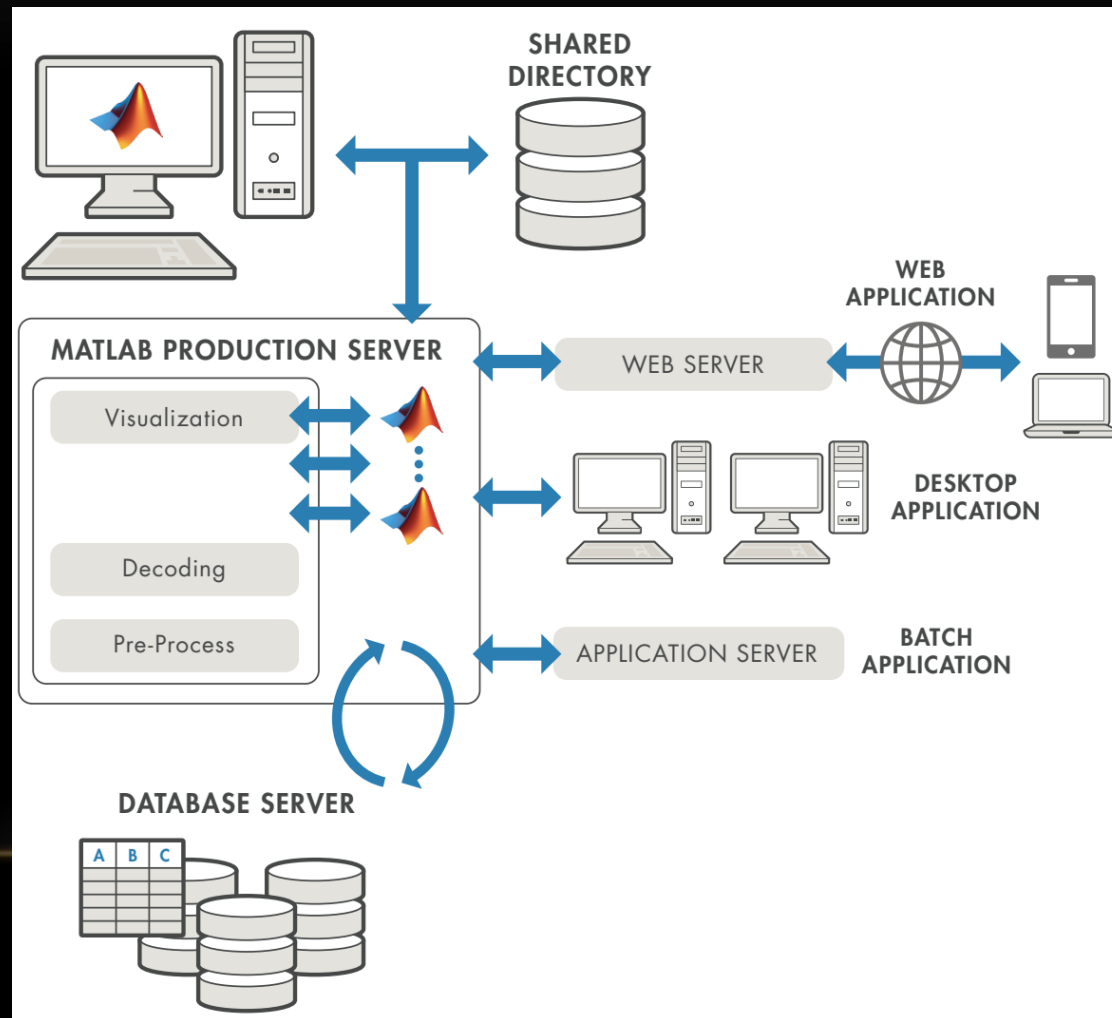
VISUALISASI PADA 5G FIELD TEST RESULTS PADA PETA

- Visualisasi pada waktu pengujian merupakan hal penting.
- Untuk beberapa aplikasi 5G seperti vehicle-to-vehicle communication dan base station coverage analysis, engineers perlu secara langsung melakukan akses data peta dengan latitude, longitude, dan menyajikan informasi lokasinya.



ANALYSIS DAN RESULTS SHARING

- Contoh kasus pada perangkat lunak Matlab application deployment tools, kita diberi kesempatan untuk menunjukkan hasil dari pekerjaan sebelumnya, dan setiap orang di dalam tim (system architects and developers, field engineers, dan management team) dapat mengamati dari jarak jauh dan memvalidasi kinerja dan menganalisis hasilnya.



REFERENSI:

1. ___, "5G Development with MATLAB", Matworks Tutorial, 2020.
2. Emeka Obiodu, et. all. , "The 5G Guide A Reference for Operators", GSMA Group, April 2019.
3. Fa-Long Luo, "Signal Processing for 5G Algorithms and Implementations", John Wiley & Sons, Ltd , 2016.
4. ___, "5G Basics", ITU-T, 2017.
5. *Alexander Kukushkin*, "Introduction to Mobile Network Engineering GSM, 3G-WCDMA, LTE and the Road to 5G", John Wiley & Sons Ltd, 2018.
6. Athanasios G. Kanatas , et all., "New Directions in Wireless Communications Systems From Mobile to 5G", CRC Press Taylor & Francis Group, 2018.
7. Saad Z. Asif, "5G Mobile Communications Concepts and Technologies", RC Press, Taylor & Francis Group, 2019.